



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY**

INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

**ROBOTICKÝ STOLNÍ FOTBAL**

ROBOTIC TABLE FOOTBALL

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Petr Mareček**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. et Ing. Stanislav Lang**

**BRNO 2016**



## Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav automatizace a informatiky  
Student: **Bc. Petr Mareček**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Aplikovaná informatika a řízení  
Vedoucí práce: **Ing. et Ing. Stanislav Lang**  
Akademický rok: 2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### Robotický stolní fotbal

#### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce bude zahrnovat rešerši problematiky realizace robotického stolního fotbalu. Následovat bude vlastní návrh provedení robotického stolního fotbalu (včetně výkresové dokumentace). Implementační částí práce bude řízení os stolního fotbalu s využitím řídicích prostředků společnosti B&R. Zpracování obrazu a herní strategie nejsou součástí této práce, nýbrž obsahem stejnojmenné práce jiného autora.

Práce bude realizována ve spolupráci s firmou B+R Automatizace s r.o., která poskytne pro realizaci řídicí prostředky a část know how v oblasti řízení pohonů.

#### Cíle diplomové práce:

- Provedte rešerši současných řešení robotického stolního fotbalu.
- Seznamte se s řídicími prostředky B&R a vývojovým prostředím Automation Studio.
- Navrhnete realizaci robotického fotbalu (výběr hrací soupravy, výběr pohonů, konstrukční návrh, návrh umístění řídicího a senzorického systému, bezpečnostní opatření).
- Realizujte řízení jedné osy robotického stolního fotbalu pomocí vhodně zvolených pohonů.
- Herní strategie bude provedena jiným řešitelem, připravte proto vhodný komunikační interface.

#### Seznam literatury:

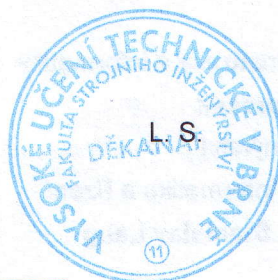
B&R Automation, <http://www.br-automation.com/cs/>, přístup 26. října 2015

Mañas, M. (1991): Teorie her a její aplikace, SNTL, Praha



Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16.

V Brně, dne 24. 11. 2015



Ing. Jan Roupec, Ph.D.

ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.

děkan

## ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce je návrh robotického fotbalu s realizací konstrukce a řízení jedné osy stolního fotbalu. V úvodu jsou popsána dosud vyvinutá řešení. Další kapitoly popisují výběr hracího stolu a specifikaci lineárního, rotačního motoru. Jsou zde uvedeny konstrukční vize s umístěním zvolených komponent spolu s návrhem umístění senzorického systému pro detekci míčku. V závěru konstrukční části je specifikace a řešení umístění bezpečnostních prvků. Programovací část práce zahrnuje implementaci komunikačního rozhraní pro použití dat z řídicího algoritmu robotického fotbalu.

## ABSTRACT

The aim of this diploma thesis is the design of robotic table football with the realization of the construction and control a single axis of table football. In introduction are described previously developed solutions. Next chapters contain a selection of specific gaming table and specification of linear, rotary motor. There are presented design visions with the placement of selected component together with proposal location of sensor system for ball detection. In the end of design section is specification and solution of placement safety features. The programming part of the thesis involves the implementation of a communication interface for data processing from the control algorithm of robotic table football.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Stolní fotbal, B&R, LinMot®, lineární motor, ACOPOSmicro, Automation Studio, průmyslové vidění, COGNEX, bezpečnostní optická mříž, DATALOGIC.

## KEYWORDS

Table Foosball, B&R, LinMot®, linear motor, ACOPOSmicro, Automation Studio, industrial vision, CONGEX, safety light curtain, DATALOGIC.



## **PROHLÁŠENÍ O ORIGINALITĚ**

Prohlašuji, že předložená diplomová práce je původní, citace použitých zdrojů je úplná a že jsem ve své práci neporušil autorská práva.

V Brně dne 27. května 2016

.....  
Bc. Petr Mareček





## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

MAREČEK, P. *Robotický stolní fotbal*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 74 s. Vedoucí diplomové práce Ing. et Ing. Stanislav Lang.



## PODĚKOVÁNÍ

V první řadě děkuji svému vedoucímu Ing. et Ing. Stanislavu Langovi za vedení při tvorbě mé diplomové práce, za pozitivní myšlení a za poskytnutý čas. Společnosti Bernecker&Rainer automatizace s.r.o. patří poděkování za poskytnutí technických prostředků pro realizaci projektu a jejím zaměstnancům za cenné rady, pomoc při řešení nespočtu problémů. Chci poděkovat také své ženě a rodičům za inspiraci a podporu, bez které by tato diplomová práce vznikala jen těžko.



**Obsah:**

	<b>Zadání závěrečné práce.....</b>	<b>3</b>
	<b>Abstrakt.....</b>	<b>5</b>
	<b>Prohlášení o originalitě.....</b>	<b>7</b>
	<b>Bibliografická citace.....</b>	<b>9</b>
	<b>Poděkování.....</b>	<b>11</b>
<b>1</b>	<b>Úvod.....</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>Vyvinutá řešení.....</b>	<b>17</b>
2.1	Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.....	17
2.2	The Georgia Institute of Technology.....	18
2.3	Katedra řídicí techniky elektrotechnické fakulty ČVUT v Praze.....	18
2.4	The University of Akron, Ohio's Polytechnical University.....	19
2.5	Rekapitulace.....	20
<b>3</b>	<b>Společnost B&amp;R.....</b>	<b>21</b>
3.1	Systém X20.....	22
3.2	Průmyslové počítače.....	22
3.3	Řízení pohybu.....	23
3.4	Programovací prostředí Automation Studio.....	24
<b>4</b>	<b>Stolní fotbal.....</b>	<b>25</b>
4.1	Historie.....	25
4.2	Popis stolu.....	25
4.3	Cíle a taktika hry.....	25
<b>5</b>	<b>Návrh řídicího systému.....</b>	<b>27</b>
<b>6</b>	<b>Výběr komponent robotického fotbalu.....</b>	<b>29</b>
6.1	Stolní fotbal.....	29
6.1.1	GARLANDO G-500 EVOLUTION LONG.....	29
6.1.2	GARLANDO WORLD CHAMPION.....	29
6.1.3	Shrnutí výběru stolního fotbalu.....	30
6.2	Motor pro rotační pohyb.....	30
6.2.1	Shrnutí výběru rotačního motoru.....	34
6.3	Motor pro posuvný pohyb.....	35
6.3.1	Shrnutí výběru lineárního motoru.....	37
<b>7</b>	<b>Konstrukce robotického fotbalu.....</b>	<b>39</b>
7.1	Idea řešení konstrukce.....	39
7.2	Úpravy původního stolního fotbalu.....	40
7.3	Umístění a konstrukce uložení pohonů.....	41
7.4	Návrh pojízdného kabinetu.....	42
7.5	Koncepce umístění kamery a osvětlení.....	43
7.6	Návrh detekce vstřelení branky.....	43
7.7	Specifikace a umístění bezpečnostních komponent.....	44
7.7.1	Bezpečnostní optická mříž.....	45
7.7.2	Vytyčení bezpečných zón.....	47
<b>8</b>	<b>Návrh a popis řídicího systému.....</b>	<b>49</b>
<b>9</b>	<b>Realizace konstrukce.....</b>	<b>51</b>
<b>10</b>	<b>Parametrizace a řízení pohonů.....</b>	<b>53</b>
10.1	Připojení pohonů.....	53
10.2	Nastavení parametrů motorů.....	53
10.2.1	Založení projektu.....	53
10.2.2	Parametry rotačního servomotoru.....	54
10.2.3	Parametry lineárního motoru.....	55



10.2.4 Diagnostika pohonů.....	55
10.3 Testování základních pohybů pohonů.....	58
<b>11 Implementace rozhraní pro řídicí program.....</b>	<b>61</b>
<b>12 Návrhy pro pokračování.....</b>	<b>65</b>
12.1 Návrhy na zlepšení.....	65
12.2 Pokračování projektu.....	66
<b>13 Závěr.....</b>	<b>67</b>
<b>14 Seznam použité literatury.....</b>	<b>69</b>
Obsah CD.....	71
Seznam výkresové dokumentace.....	73

# 1 ÚVOD

Slovo Robot poprvé použil Karel Čapek ve své divadelní hře R.U.R. Pojmenoval tak umělého dělníka v továrně. Touto ideou společně s rozvojem techniky a informačních technologií začala náhrada lidské pracovní síly. Roboti našli uplatnění zejména ve velkosériové výrobě. Snahou je například snížit zmetkovitost, zvýšit produktivitu, zisk a přesnost. Roboti se také používají pro detekci bomb a chemikálií. Snižují tak riziko přímého styku s nebezpečím. V lékařském oboru chirurgie se používají pro operace na dálku, nebo pro zákroky náročné na přesnost. Armády využívají těchto technologií k obraně a útoku. Jsou to například plně automatizované obranné věže proti vzdušným cílům na lodích nebo bezpilotní letouny. V poslední době se roboti objevují i za účelem zábavy, či prezentace pokročilých znalostí a technologií. Příkladem robotů pro zábavu jsou hračky napodobující domácí mazlíčky, experimentální roboti apod. Existují také robotické stolní fotbaly vytvořené k ukázce aplikace robotizace a znalostí.

Cílem této práce je navrhnout a realizovat jednu osu robotického fotbalu za účelem prezentace kvalitního systému, jehož předností je ukázka adaptability řídicího systému od firmy B&R. V tomto případě systém zpracovává snímanou polohu míčku z kamery výrobce Cognex. Na základě těchto dat je řízen lineární motor LinMot® společnosti NTI AG a servo motor firmy B&R, kde výsadou aplikovaného lineárního motoru je absence mechanické vazby mezi částí konající lineární pohyb a statickou částí motoru. Je to individuální případ nevýrobního systému, kde robotický fotbal má za úkol nahradit jeden lidský tým.

Úvod práce je věnován řešerši doposud vyvinutých řešení robotických fotbalů. Následuje stručný přehled technologií a výrobků společnosti B&R. Další kapitoly popisují specifikaci hrací soupravy, rotačního a lineárního motoru, umístění snímacího zařízení s řídicím systémem. Praktická část seznamuje s potřebnými konstrukčními úpravami na herním stole nutnými pro získání vhodných podmínek detekce míčku. Práce dále obsahuje popis návrhu uchycení pohonných jednotek ke stolu, mechanismus pro přenos lineárně rotačního pohybu a konstrukci pojízdného kabinetu. Závěr této kapitoly se věnuje návrhu a umístění bezpečnostních prvků celého systému. Po specifikaci zmíněných komponent následuje koncepce řídicího systému s popisem dosavadní realizace robotického stolního fotbalu. V posledních částí diplomové práce je uveden postup parametrizace motorů a implementace programu pro zpracování dat z řídicího systému pro jednotlivé pohony.



## 2 VYVINUTÁ ŘEŠENÍ

Z počtu doposud vytvořených prací tohoto typu lze usoudit, že jde o poměrně mladou a neobvyklou ukázkou robotizace. Většina níže zmíněných robotických fotbalů vznikla při školních projektech, diplomových pracích. Do stavu komerčního prodeje se dostal pouze jeden projekt.

### 2.1 Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

V roce 2002 byl vyvinut plně autonomní stolní fotbal za účelem výzkumu robotiky a umělé inteligence. Celý systém je schopný padesátkrát za sekundu provést kompletní cyklus. Perioda zahrnuje zpracování snímaných hodnot ze senzorů a na základě těchto veličin určuje reakci systému. Řídicí systém poté zasílá příkazy kontrolérům motorů.

Kamera umístěná nad hracím stolem posílá snímky do počítače každých 20 ms (milisekund). Po zpracování obrazu se vypočítají regiony pozic, úhly natočení hráčů a poloha míčku. Jelikož je kamera nad stolem, dochází k překrývání pohledu na míč hráčem či hrací tyčí. Tento problém je vyřešen programově předáváním vlastnosti „vlastník míčku“ mezi hráči při dosahu hráče na míček.

Pro řešení měnící se herní situace je implementována série akcí. Například při neznámé pozici míčku se osy s hráči ustaví do základní polohy. Mez další akce patří odpálení, blokování nebo nechání projítí míčku vlastními hráči při střele hráčem robotu.

Pohyb jednotlivých os je uskutečněn pomocí servo motoru a řemenového lineárního motoru. Motor otáčí přes řemenový převod rotační hřídel. Po ní se posouvá uložení dalšího řemenového převodu, ve kterém je první ozubené kolo na rotační ose a druhé na konci posuvné hřídele (hrací tyče). Lineární motor pohybuje uložení a pohybuje tak celou hrací osou. Tento celek je připevněn pomocí ocelové konstrukce ke stolu.

Robotický fotbal byl testován na dvou veřejných akcích, kde odehrál za 22 hodin 102 utkání. Systém nenechal ani jednou vyhrát absolutní začátečníky. Proti amatérům uhrál poměr 5:1 (výhra:prohra) a u profesionálních hráčů ani jednou nevyhrál.

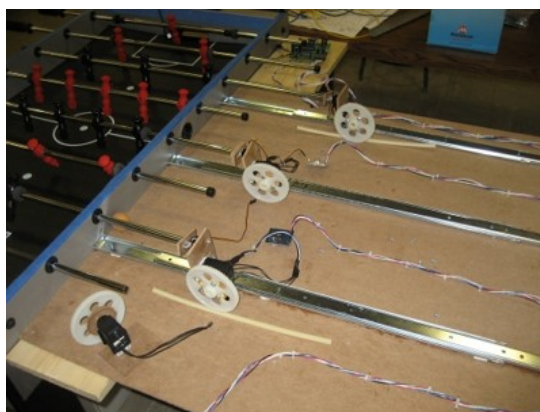
V roce 2005 firma Gauselman AG upravila stávající projekt do podoby pro komerční prodej. Barevná kamera byla vyměněna za černo bílou a přemístila se pod stůl, kde přes nakloněné zrcadlo snímá hrací plochu zdola. Hřiště nasvěcují infra červená LED světla a pozice míčku je vykreslena jako půlměsíc. Posuvný pohyb osy robotického fotbalu je zajištěn pootočením kol, na kterých jsou navinutá lanka. Ta jsou přes kladky přivedena na hrací tyče. Rotační pohyb provádí motory připojené přímo na osy. Herní strategii byla doplněna o zkušenosti z předešlých akcí a výsledkem je skóre 6:1. Celá konstrukce je zaopatřena uživatelsky přijatelným designem, který zároveň znemožňuje vystavení obsluhy nebezpečí (*Obr. 1*). Cena jednoho kusu se pohybuje kolem 600 000 Kč. [1]



*Obr. 1 Komerční podoba robotického fotbalu. [2]*

## 2.2 The Georgia Institute of Technology

Snahou tohoto projektu je snížit náklady spjaté s konstrukcí systému. Pro snímání je použita vysokorychlostní web kamera s rychlostí 60 FPS (Frame Per Second) při rozlišení 1,3 Mpx (Mega pixel). Je připojená přes USB (Universal Serial Bus) kabel k počítači. Počítač zpracovává a vyhodnocuje data z kamery. Pro zkrácení doby výpočtu trasy míčku je implementován prediktivní algoritmus určující pravděpodobnou oblast výskytu míče. Z počítače jdou příkazy přes sériovou linku do PIC (Programmable Interface Controller) servo kontroléru. Ten řídí všechny čtyři herní osy. Pohyby tyčí zajišťují dvě serva. Jedno se stará o rotační pohyb, druhé o posuvný pohyb pomocí ozubeného kola a hřebene. Motory jsou upevněny na dřevěné desce (Obr. 2). Celá konstrukce není zaopatřena bezpečnostními prvky. Do systému je implementována jednoduchá taktika (obrana, útok). Cena za všechny použité komponenty dosáhla částky 12 500 Kč.



Obr. 2 Uložení pohonů. [4]

Tato cena je limitující a projevují se například nedostatky z pohledu konstrukce. S fotbalem nelze manipulovat, neobsahuje žádné ochranné prvky. Zvolená serva se projevila jako nedostačující, protože svou dynamikou nestíhají reagovat na aktuální herní situaci. Vybraná kamera má limitovanou rychlost komunikace skrz připojení přes USB. Implementace základní umělé inteligence se povedla, ale pro další rozvíjení je omezena například rotací serva. Servomotor se může pootáčet pouze v rozmezí 0 – 90°. [3]

## 2.3 Katedra řídicí techniky elektrotechnické fakulty ČVUT v Praze

V tomto diplomovém projektu tvůrce navrhuje řízení jedné herní osy fotbalu (obraně dvojce). Pro detekování míče testuje postupně dvě kamery umístěné nad stolem. První kamera má snímkovou frekvenci 60 FPS při rozlišení 1280x1024 px. Společně s objektivem Tamron 8 mm dokáže předat informace do řídicího systému v době 25,5 ms od pořízení snímku. Druhá kamera s frekvencí 98 FPS při čtvrtinovém rozlišení 320x240 px se stejným objektivem dosahuje času 13 ms. Čas zpracování obrazu se snížil přidáním LED osvětlení, nabarvením míčku na černo a výměnou černých dorazů herních os za dorazy s bílou barvou, tak aby celou expozicí snímaného obrazu převažovala bílá barva.

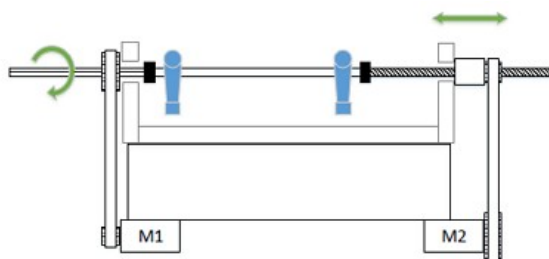
Pohyb tyčí zajišťují dva servo motory spolu s řídicím systémem od firmy Siemens. Jedno servo otáčí osou přes řemenový převod a koná tím odpal míčku. Druhé stejným převodem otáčí maticí posuvného šroubu, která je připevněná ve stěně stolu. Maximální doba pro přesun osy na jakoukoli pozici je 500 ms. Oba pohony jsou na sobě závislé a v době jejich nečinnosti jsou sepnuty jejich brzdy. Z tohoto důvodu se stanovil převodový poměr, který se následně použil pro softwarovou synchronizaci pohybů os (Obr. 3).

Ochranu obsluhy zajišťuje kabinet z plexiskla s otvorem ve vrchní části, bezpečnostní kamera a relé. Kabinet je usazen na stole a kamera hlídá průchod otvorem.

V programovací části je implementace pokročilých pohybů dle situace na hřišti. Obsahuje algoritmus pro zastavení útoku (míč směřuje vyšší rychlostí k vlastní ose) i pro odehrání. Zde může probíhat odehrání buď přímo nejbližším hráčem, nebo s přihrávkou druhému hráči a následným



odkopem. Podařilo se vytvořit systém jehož doba reakce od pořízení snímku po odkop je maximálně 28 ms. Při stávajícím řešení dosahuje rychlost míčku po odpalu zhruba 10m/s a lze ji i navýšit.

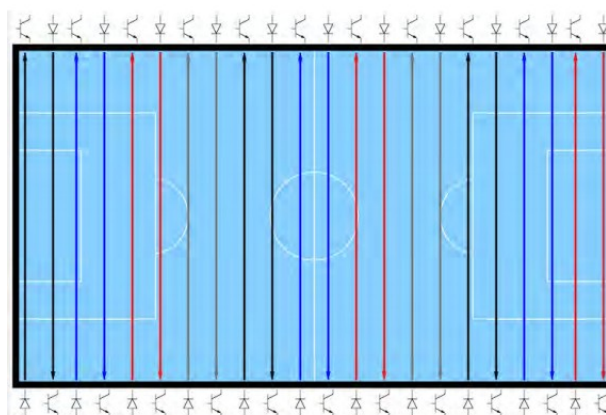


Obr. 3 Schéma použití motorů. [5]

Zrychlením rotačního pohybu u posuvného šroubu dochází však ke zvýšení hlučnosti a vibracím. Vůle u ozubeného převodu je ve výsledku několik stupňů u natočení hráče a projevuje se při přesunu osy, kdy dochází k nevyžádanému postrčení míčku. [5]

## 2.4 The University of Akron, Ohio's Polytechnical University

Doposud popsané projekty používají pro snímání hrací plochy kamery. V tomto případě je kamera nahrazena pomocí uspořádaných dvojic LED diod vyzařujících infračervené světlo (IR LED) a fototranzistorů. Pozice míčku je získávána přerušením paprsku vyzařujícího IR LED diodami. Výhodou toho řešení je rychlá odezva. Umístění dvojic je ve dvourozměrném poli. V horizontálním směru (v délce stolu) je 117 a ve vertikálním směru (výška stolu) je to 68 párů fototranzistorů s diodami (Obr. 4).



Obr. 4 Uspořádání dvojic IR LED a fototranzistorů. [6]

Druhou uvažovanou variantou je umístění pole optických reflexivních snímačů na hrací plochu. Zde by se snímače spínaly na tmě (překrytí míčkem). Tato verze je přesnější, ale oproti prvnímu řešení je dražší.

Opatřením proti vzájemnému ovlivňování sousedících diod je zahloubení diod do stěny stolu. Spínáním impulsů v různém časovém intervalu se dosáhlo nejbližší vzdálenosti mezi právě sepnutými diodami na 32 centimetrů. Časové úseky jsou barevně odlišeny do skupin (celkem 16 časových úseků (Obr. 4)).

Výstup z fototranzistoru je digitalizován pomocí komparátoru a poslán do mikroprocesoru. Stejným způsobem je zajištěno i automatické zaznamenávání vstřelených gólů.

Pro pohyb os jsou použity lineární pohony pro posuv a krokové motory provádějící rotaci. Implementace herní strategie zahrnuje dva hlavní body (obrana, útok). Obrana je dále rozvedena do tří skupin (jednoduchá, aktivní, dle trajektorie míčku).

## 2.5 Rekapitulace

Existuje několik dalších robotických fotbalů vycházejících z výše popsaných řešení nebo vzniklých kombinací použitých komponent. Pohyb je vždy zajištěn pomocí dvou pohonných jednotek. Snímání polohy hráčů a míčku je nejčastěji provedeno pomocí kamery zdola či ze shora. Jako řídicí systém je použit osobní počítač, mikroprocesor nebo průmyslový řídicí systém.

Robotický stolní fotbal vyvinutý v této práci je řízen průmyslovým řídicím systémem od firmy B&R. Vhodným výběrem jednotlivých komponent je zajištěna rychlá dynamika systému zvládající přesné a časově náročné operace. Včasné zpracování obrazu uskutečňuje kamera od firmy COGNEX komunikující přes POWERLINK protokol. Pohyb herní osy koná jeden lineární motor od firmy NTI AG s obchodním označením LinMot®. Vrchní část stolu je zabezpečena kombinací aktivních a pasivních bezpečnostních prvků, které zajišťují bezpečnost hráčů. Pohony jsou montovány do manipulovatelné konstrukce pro případné odpojení celého systému od stolu. Konstrukce je uzpůsobena tak, aby po odpojení řídicího systému, zůstal stolní fotbal v co nejvíce původním stavu.

Ve srovnání s uvedenými projekty použité průmyslové komponenty navýší náklady, zato však poskytnou preciznost, výbornou dynamiku a rychlou odezvu. V budoucnu po aplikaci motorů na všechny osy může tento robotický fotbal konkurovat výše zmíněným řešením.

### 3 SPOLEČNOST B&R

Firma Bernecker + Rainer Industrie Elektronik Ges.m.b.H. (B&R) byla založena v roce 1979 pány Erwinem Berneckerem a Josefem Rainerem se sídlem v rakouském městě Eggelsbergu. Na český trh se dostala v roce 1997 s českou pobočkou v Brně. Výroba produktů a školení vlastních pracovníků probíhá v Rakousku. Rozvoj firmy představují investice do vývoje, vylepšování produktů (kolem 50 milionů eur ročně), aplikace řešení přímo na daný problém a vstřícný zákaznický servis.



*Obr. 5 Produkty firmy B&R. [7]*

V celém třicetiletém působení dokázala společnost přicházet vždy s technickými řešeními, o která byl na trhu zájem. Nejprve to byl v roce 1980 čítač Unicount a také volně programovatelný PLC Unicontrol, který se ve své době řadil mezi nejpokrokovější automatizační řešení. Dalšími generacemi PLC vycházela firma B&R vstříc požadavkům zákazníků a postupně pronikala také na trh řízení pohonů, CNC a operátorských panelů. Milníkem se stal rok 1993, kdy firma vstoupila na trh průmyslových počítačů (IPC2000). V roce 1995 nastoupil směr decentralizované automatizace založené na sběrnici CAN a byl také na trh uveden programovací systém založený na DOS. Okolo roku 2000 se společnost B&R podílela na vývoji komunikačního protokolu Ethernet POWERLINK, který pak využívala ve svých produktech. Později byl vyvinut i komunikační systém Ethernet POWERLINK Safety pro bezpečnostní úlohy. V roce 1999 uvedla firma na trh Power Panel, který v jednom zařízení integruje řídicí, vizualizační a ovládací funkce. Postupně byly uváděny na trh moduly I/O X67 a X20 a jednotky pro řízení pohonů. Vedle sortimentu řídicích jednotek a operátorských panelů byla postupně rozšiřována i nabídka pohonů, doplněná například řadou frekvenčních měničů. V současnosti má B&R ucelenou nabídku řídicích jednotek a pohonů včetně příslušného softwaru. Od roku 2000 dodává B&R jednotný vývojový software Automation Studio (AS), který v současné době dospěl již do své čtvrté generace. AS se uplatňuje ve všech fázích projektu a po celou dobu životnosti zařízení a navíc v něm lze programovat textovými i grafickými jazyky (C++, ANSI C, FBD, atd.).[8]

V posledním desetiletí představila firma B&R systém X20, což je modulární systém skládající se z jednotlivých plátků („slice“). Připojení systému pomocí sběrnic poskytuje velký stupeň volnosti pro decentralizované strojní a systémové koncepty. Dalším významnějším produktem je víceosý systém servopohonů s rekuperací ACOPOSmulti. Tato generace systémů nabízí vysoký stupeň efektivnosti pro víceosé stroje v oblasti zpracování plastů, balení, tisku a textilního průmyslu. Dále přibyla možnost převádět kód vytvořený v prostředí MATLAB/Simulink do prostředí AS pomocí automatického generování kódu. V roce 2008 přišel podnik B&R s průmyslovými počítači s vícejádrovými procesory. O pět let později se vyvinula diagnostika na principu web-technologie System Diagnostics Manager (SDM). Pomocí SDM můžeme přes internetový prohlížeč zjistit konfiguraci anebo sledovat stav cílového systému. V poslední době firma vyvinula „reACTION“ technologii, se kterou je schopna zredukovat čas cyklu v průmyslové automatizaci na 1  $\mu$ s (mikrosekund). [9]

### 3.1 Systém X20

Systém X20 je tvořen strukturou složenou z jednotlivých plátek („slice“), které jsou skládány vedle sebe. Každý „slice“ se skládá ze tří částí (obr. 6 vlevo), které jsou schopné svojí variabilitou poskytnout řešení pro různé potřeby uživatele. Skládáním plátek vznikají jednotlivé moduly a pomocí modulů je tvořen systém. Tento systém lze vytvářet centralizovaně i decentralizovaně, člověk si sám stanovuje jeho topologii, strukturu a vlastnosti. (Obr. 6)



*Obr. 6 Systém X20 a výkonové panely s průmyslovými počítači. [7]*

První třídou jsou řídicí systémy X20. Centrální procesorová jednotka (CPU) tohoto systému zvládne jeden cyklus za 100  $\mu$ s. Standardní výbavou jsou komunikační protokoly RS232, Ethernet a USB. Je možno přidat i protokol POWERLINK pro komunikaci v reálném čase. CPU je koncipován pro připojení až 250 X20 I/O (In/Out) modulů, tzn. až 3000 kanálů může být připojeno přímo v jednotce. Řídicí systém obsahuje napájecí zdroj, kterým lze případně napájet senzory i pohony. Vzdálenost I/O modulu při spojení s CPU pomocí kabelu lze navýšit až na 100m.

Další skupinou jsou I/O moduly. Každý plátek se skládá ze svorkovnice, elektrického modulu a sběrnicového modulu. V nabídce jsou k dostání obvyklé moduly (digitální vstupy/výstupy, analogové vstupy/výstupy, napájecí zdroje, měření teploty), ale i moduly pro méně časté použití (regulátory motorů).

Poslední třídou je X20 se „safety“ technologií. Společnost B&R získala certifikát TÜV Rheinland, který umožňuje používat tuto technologii v bezpečnostních aplikacích. Jedná se o inteligentní, decentralizovanou a integrovanou bezpečnostní technologii s extrémně krátkými časy odezvy. Technologie je například schopna chytrými reakcemi pozastavit jen část stroje nebo například snížit rychlost pohybu stroje po otevření bezpečnostního krytu.

### 3.2 Průmyslové počítače

Průmyslové počítače jsou poskládány z komponent s vysokou spolehlivostí. Je tak zaručen bezporuchový chod v nejrůznějších průmyslových aplikacích. Chlazení je pasivní (bez ventilátoru) a teplo se z komponent počítače přenáší pomocí tepelných trub (,,heat pipe“). Uvnitř počítače pracuje procesor od firmy Intel a to od jednojádrového procesoru Celeron až po čtyřjádrový Core i7.

Procesory iCore disponují technologií AMT (Active Management Technology). Pokud je počítač zapnutý a je připojen do informační sítě, lze na dálku zjistit jeho stav na hardwarové úrovni. Je i možnost mu měnit konfiguraci BIOS či restartovat. Data a software nejsou uloženy na CompactFlash médiu, jak je to například u řídicích systémů X20, ale na CFast kartě. Ta využívá sériovou sběrnici ATA. Karty jsou univerzální a lze je použít na jakýkoliv jiný průmyslový počítač firmy B&R. Průmyslové počítače mohou být integrovány do zobrazovacího panelu a tvoří tak skupinu tzv. výkonnostních panelů. Na této dvojici lze měnit obě komponenty podle potřeby uživatele. Například při potřebě zvýšit výkon se vymění počítač při zachování původního displeje.

### 3.3 Řízení pohybu

Digitální servozesilovače ACOPOS (Advanced Coordinated Optimized POSitioning) jsou vyvinuty k řízení synchronních i asynchronních motorů s napájecím napětím 3 x 400V v proudové, rychlostní i polohové smyčce. Součástí servo zesilovače jsou integrované brzdné rezistory a odrušovací filtr EMC (Electromagnetic Compatibility). Digitální signálový procesor pracuje rychlostí 128 Mflops (Milion Floatin-Points per Second). Procesor sleduje zatížení výkonových částí servozesilovače a podle této zátěže upravuje funkci ACOPOSu. Provádí se měření teploty například na desce plošného spoje, kondenzátorech, brzdných rezistorech, bipolárních tranzistorech s bipolárním hradlem a motoru. Z těchto teplot se vypočítává matematický teplotní model a z tohoto modelu se určí skutečné výkonové zatížení. Sledováním výkonu lze dodávat motoru ve výkonových špičkách relativně vysoké proudy bez rizika poškození motoru. Vlastní pohyb osy je řízen pomocí pulsně šířkové modulace signálu (PWM) o počáteční frekvenci 20kHz. [10]

Zpětnou vazbu poskytují snímače polohy EnDat s rozlišením přes 500 000 dílků na otáčku. Součástí snímačů je elektronický typový štítek, ve kterém jsou uložena data o použitém motoru (dodávaný obvykle se servozesilovačem). Není nutnost synchronizace ACOPOSu s připojeným motorem.



*Obr. 7 Řídicí systém ACPOSmulti a synchronní motor. [7]*

Tak jako u všech řídicích systémů společnosti B&R lze i řízení připojeného motoru nastavit, ladit a tvořit složité polohovací aplikace v prostředí AS. Softwarový balíček s názvem Motion Components umožňuje převést řízenou osu do aplikace. Osa má podobu struktury, kde jednotlivé složky popisují její vlastnosti (např. vstupní/výstupní signály, požadované/okamžité proudy, rychlost, zrychlení, polohu atd.). Potřebné funkce pro polohovou aplikaci jsou pak prováděny nad těmito strukturami. S výsledky funkcí a jednotlivými parametry se pracuje jako s obyčejnými proměnnými.

Pro řízení více os je používán servozesilovač ACOPOSmulti (Obr.7) v modulární podobě. Výkonově je škálován od 1,4 až do 120kW a má integrovanou bezpečnostní technologii. V prostředí Automation Studio jsou koncipovány grafické editory pro definici závislosti os (master-slave). Naopak pokud není možná definice závislosti os předem, pracuje se s celým systémem (objekty programu jsou osy) a závislosti os se definují za běhu programu. Program nabízí také implementované technologické prvky (elektrické převodovky, letmé pily, spřažení os do systémů CNC atd.). Práci pohonů lze sledovat v reálném čase pomocí elektronického osciloskopu (Data Tracer) v AS.

Součástí firmwaru je funkce Repetitive Control, která vylepšuje přesnost a dynamiku stroje. Funkce systematicky odstraňuje výkyvy momentů z vlečné regulace. Algoritmus upravuje rychlostní smyčku regulátoru servoměniče, kde upravuje žádaný moment motoru tak, aby eliminoval periodické odchylky od žádaných hodnot polohy a rychlosti. Funkce se přizpůsobuje v průběhu momentu zátěže, dané například opotřebením hnaného mechanismu. [11]



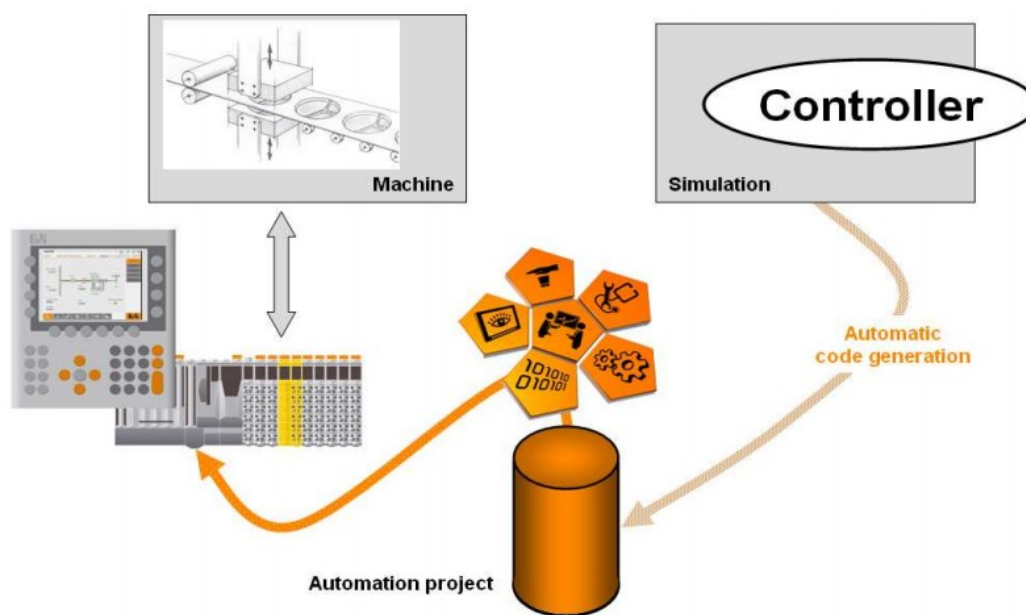
### 3.4 Programovací prostředí Automation Studio

Automation Studio (AS) 4 je čtvrtá generace vývojového prostředí, ve kterém je možné programovat funkce pro všechny možné prvky společnosti B&R (průmyslová PC, výkonové panely, APC a systémy X20). Programátorovi jsou přístupné všechny programovací jazyky z IEC 61131-3, jazyky CFC (Continuous Function Chart), C a objektové orientovaný C++.

Uživatel je schopen v počátcích vývoje programu využít modely, jejichž funkce jsou generovány na základě údajů simulace z kinematického a dynamického chování jedné komponenty nebo celých CAD modulů. AS je schopno automatického generování kódů z programů vytvořených v MATLAB/Simulink a MapleSim do programovacích jazyků C, Structured text (Obr. 8). Výsledkem převodu je samostatný modul. Možností je i obrácený převod z AS do zmíněných programů.

Studio nabízí také technologické bloky pro zkrácení času programování a také přístup ke všem PLCopen funkčním blokům. Vytvořené projektové soubory jsou sdíleny ve formátu XML (eXtensible Markup Language), zajišťující přístup a komunikaci třetím stranám (řízení materiálu, plánování výroby). Data jsou také přístupná v databázích pomocí SQL (Structured Query Language) rozhraní. Automation Studio obsahuje architekturu OPC (OLE for Process Control) pro přímé připojení do řídicí úrovně, čímž se zajistí kompatibilita s různými systémy.

Součástí programovacího prostředí je integrovaný protokol pro bezpečnostní řešení s názvem openSAFETY. Protokol umí přenášet zabezpečené data přes jakoukoli sběrnici na principu Black Channel.



Obr. 8 Schéma automatického generování kódu. [12]

Runtime prostředí ARsim nabízí testování programů bez fyzické přítomnosti hardwaru. Před zahájením programování a simulací se navolí imaginární hardware z dostupných knihoven a následně na zvoleném systému probíhá zkoušení naprogramovaných funkcí. Pokud dojde ke změně fyzicky připojeného hardwaru, AS je schopno detekovat tyto změny a upravit hardwarovou konfiguraci. Tímto je zaručena adaptabilita softwaru na změnu hardwaru.

Funkční bloky SafeDesigner (SD) napomáhají při programování bezpečnostních aplikací redukovat kód. SD izoluje data a programy související s bezpečností do tzv. SafeContainer se speciálními přístupovými právy.

Pro integrované HMI (Human Machine Interface) jsou dodávány softwarové balíčky sloužící ke snadnějšímu tvoření aplikací, na všech typech hardwaru od B&R. Softwarové balíčky umožňují integrovat ovládání do běžně dostupných zařízení (vestavěné systémy, počítače s Windows, chytré telefony, atd.).

## 4 STOLNÍ FOTBAL

### 4.1 Historie

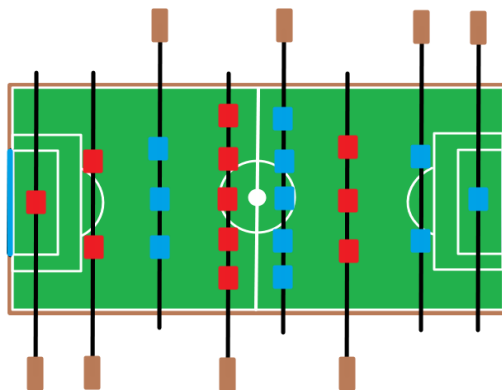
Stolní fotbal, v anglickém jazyce znám jako „table football, foosball“, vznikl jako stolní hra a dnes je brán i jako sport.

První zmínky pocházejí z Evropy z konce 18. století, do dnešní podoby ho poprvé navrhl Harold Searles Thornton v roce 1921 a o rok později si svůj vynález nechal patentovat pod názvem: „Apparatus for Playing a Game of Table Football“. Chtěl tak přenést dění na klasickém fotbalovém hřišti do podoby pro hraní v domácnosti. Jeho strýc Louis P. Thornton se od Harolda nechal inspirovat a v roce 1927 si nechal patentovat stolní fotbal ve Spojených státech amerických. V USA se stal stolní fotbal velmi populární v 70. letech a zachoval si své příznivce i po nástupu videoher.

V roce 2002 vznikla ve Francii mezinárodní federace stolního fotbalu (International Table Soccer Federation). Organizace nastavuje mezinárodní pravidla hry, etiku hráčů, pořádá turnaje, a spolupracuje s mezinárodní olympijskou komisí. Federace úspěšně povyšuje tuto rekreační hru na sport.

### 4.2 Popis stolu

Herní stůl napodobuje reálné fotbalové hřiště (dvě branky, 11 hráčů, obdélníkový půdorys). Hrací pole je o rozměrech 120 x 70 cm, je tvořeno pískovaným sklem o tloušťce 5 mm, pod kterým je deska z dřevotřísky sloužící jako podpora. Celé hřiště je postaveno na nohách ve výšce přibližně 1 metr. Hráči jsou nalisováni na jednotlivých osách. Hracích tyčí je celkově osm pro 4 hráče (dva týmy). Rozestavění hráčů směrem od branky je 1 – 2 – 5 – 3 (brankář – obrana – záloha – útok). Mezi obranou, zálohovou a útočnou řadou jsou vloženy osy protihráče (Obr. 9). Osy jsou uloženy v kluzných ložiscích s madly na koncích pro uchopení hráči. Rohy po obvodu hřiště jsou zkoseny, aby se míček nezastavoval mimo dosah umělohmotných hráčů. Míček může být plastový nebo z korku a má průměr 36 mm. Stoly lze pořídit také v komerční verzi se systémem pro vhadzování mincí a podávání míčku.



Obr. 9 Schéma stolního fotbalu.

### 4.3 Cíle a taktika hry

Směr hry je zleva doprava a cílem je ubránit svou branku vlevo a pomocí os s hráči vstřelit gól do soupeřovy branky vpravo. Obvykle se hraje na pět vstřelených gólů, ale týmy si mohou domluvit jiném počtu vstřelených branek (např. 8 – 10).

Taktik pro zvládnutí hry je velké množství. Záleží vždy na zkušenostech hráče. Základní taktikou je zpracování pohybujícího míčku, které se provádí pootáčením tyče a tím i hráče ve směru pohybu míčku do přibližně poloviny pravého úhlu. Pootáčením osy se zamezí zpětnému odrazu míčku.

Obrana se provede rozestavením hráčů obou os tak, aby utvořili co největší „zed“, edy aby hráči zabírali co největší šířku hracího pole. Útočník cíleně dělá klamné pohyby, aby „rozhodil“ obranu protivníka. Je proto vhodné sledovat polohy míčku, nikoliv protihráčů.

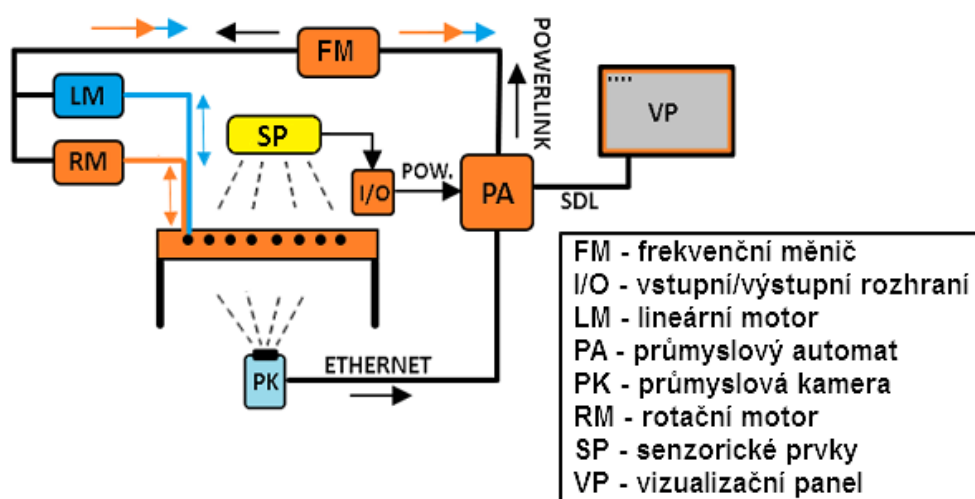
Střelu míčku lze provést prostým odpálením z místa, to však z drtivé většiny případů nemá žádný efekt, protože protihráčova obrana stojí v trajektorii odpalu míčku. Proto se doporučuje přihrávat si míček mezi hráči na téže ose a poté odpálit na branku protihráče. Zvýší se tím šance na vstřelení branky, protože přihrávkami se rozhodí obranné pozice protihráče.

Nezbytnou taktikou je mít při vlastním odpalu míčku čistou dráhu střely (tzn. aby vlastní hráči nepřekáželi v dráze). Nedílnou součástí bývá také využití mantinelu pro přihrávky mezi osami.

## 5 NÁVRH ŘÍDÍCIHO SYSTÉMU

Pro návrh řídicího systému je nutné uvažovat rychlé, dynamicky se měnící polohy míčku na hrací ploše. Je třeba získávat poměrně přesné informace o pozici míčku (v řádech milimetrů) v co největší možné frekvenci snímání obrazu. Z těchto informací se poté odvodí další hodnoty, jako například rychlost nebo směr pohybu. Tato data se buď získají přímo z inteligentní kamery, nebo dostatečně rychlým zpracováním obrazu v řídicím členu. Řídicí systém musí zvládnout hned několik dalších operací. Mimo zpracování dat musí být schopen řídit pohonné jednotky, sledovat bezpečnostní prvky, popřípadě další snímače. Poslední činností řídicí jednotky je také zobrazování stavu na displeji, a zpracování dat navolených uživatelem prostřednictvím dotykového panelu. Jednotlivé procesy robotického fotbalu jsou rozdělené do cyklických tříd, které jsou dělené podle periody. S nejnižší periodou pracuje třída obsahující bezpečnostní technologii. Sestupně má dále seřazené třídy pro komunikaci s kamerou, řízení motorů a vizualizační činnosti.

Výpočetním prvkem systému robotického fotbalu je průmyslový automat (na Obr. 10 pod zkratkou PA), pro který firma B&R používá zkratku APC (Automation PC). APC zaručí rychlé výpočetní časy a rychlou komunikaci s ostatními prvky sestavy. PA je pomocí komunikačního protokolu POWERLINK spojen s digitálními frekvenčními měniči a s vstupním/výstupním rozhraním (I/O). Servoměniče ACPOSmicro servo jsou schopné řídit dvě pohonné jednotky najednou, tedy na jednu herní osu je použit jeden frekvenční měnič. Jedna strana fotbálku je obsazena celkem čtyřmi frekvenčními měniči namísto osmi. To přináší úsporu v nákladech na hardware. Z frekvenčních měničů se získávají data o poloze lineárního motoru a servo motoru. I/O rozhraní slouží k připojení senzorických prvků (SP), například pro připojení optických závor pro snímání vstřelení branek či různých bezpečnostních čidel.



Obr. 10 Schéma návrhu řídicího systému.

Pro získávání informací o poloze míčku je použita průmyslová kamera s vhodně zvoleným objektivem, který je schopen pokrýt celou snímanou herní plochu. Kamera využívá komunikační protokol Ethernet POWERLINK pro přímou komunikaci s automatem.

Pro zobrazování polohy míčku na hrací ploše, počty vstřelených branek a další informace je nad stolem umístěn vizualizační panel (VP). Displej je připojen po SDL (Smart Display Link) k automatu. Umožňuje nejen zobrazovací činnost, ale také plní funkci dotykového displeje pro případná uživatelská nastavení.





## 6 VÝBĚR KOMPONENT ROBOTICKÉHO FOTBALU

Tato kapitola popisuje výběr jednotlivých součástí robotického fotbalu. Jsou zde uvedeny klady a zápory vybraných částí a na základě uvedených vlastností jsou s patřičným odůvodněním vybrány komponenty pro robotický stolní fotbal.

### 6.1 Stolní fotbal

Při výběru stolního fotbalu se přihlíželo k několika důležitým vlastnostem. Za prvé hrací souprava musí být kvalitně provedena. Nejsou přípustné žádné výrobní nedostatky, které by ohrožovaly uživatele a zároveň nejsou dovoleny žádné estetické vady, které by kazily celkový vizuální dojem stolu. Další vlastností je schopnost za pomoci vozíku či dvou osob přenášet hrací soupravu dle potřeby. Nesmí tedy být natolik těžký, aby s ním nebylo možno pohybovat. Důležitým faktorem pro tuto diplomovou práci je možnost rozebrání stolu a následné úpravy v konstrukci stolu. Konstrukce stolu musí být zároveň dobře vyztužená, aby při provozu nevznikaly vibrace, viklání apod. Posledním velice důležitým hlediskem je příznivá cena s ohledem na kvalitu výrobku.

Na trhu se prodávají desítky hracích souprav od různých výrobců. Ve srovnání níže je uveden pouze jeden výrobce se dvěma typy stolů. Důvodem uvedení jediného výrobce jsou opakující se typy konstrukcí. Zvolený výrobce Garlando se však liší od jiných výrobců svou dlouholetou tradicí, certifikátem ITSF (International Table Soccer Federation) a hlavně léty prověřenou kvalitou. Zmíněný certifikát normalizuje konstrukci hracího stolu do podoby, která mu umožňuje použití na celosvětových turnajích a ligách. Jedním z podcílů této práce je pokus dodržet zmíněný certifikát co se týče hrací plochy. Níže zmíněné typy stolních fotbalů mají uvedené své klady a zápory v příslušných tabulkách.

#### 6.1.1 GARLANDO G-500 EVOLUTION LONG

Tento typ stolního fotbalu je určen pro soukromé účely. Disponuje teleskopickými tyčemi, jenž poskytují pro potřebu této práce jistou výhodu v bezpečnosti lidských hráčů. U teleskopického provedení lze čekat vůle mezi vnější a vnitřní tyčí s nalisovaným kluzným ložiskem. Svou cenou patří do středu cenové relace.

Klady	Zápory
Teleskopické tyče	Otevřená hrací plocha
Rozebiratelný	Neprůhledná hrací plocha
Masivní ocelové nohy	Absence dodatečného vyztužení
Střední cenová třída	Vůle v teleskopickém uložení os
Možnost reklamního potisku	
Nekomerční verze	
Tloušťka stěny korpusu 25mm	

*Tab. 1 Vlastnosti GARLANDO G-500 EVOLUTION LONG.*

#### 6.1.2 GARLANDO WORLD CHAMPION

Stolní fotbal Garlando WORLD CHAMPION je konstruován podobně jako předchozí typ, ale jeho cílem je komerční použití. Obsahuje zařízení na vřazování mincí. Mechanismus svou konstrukcí vyztužuje korpus fotbálku. Toto zařízení spolu se silnějšími stěnami korpusu o tloušťce 30 mm přidává fotbálku na váze a přidává tím na celkové stabilitě stolu. U zmíněného modelu jsou vestavěny průchozí osy namísto teleskopických. Což odstraňuje vůle zmíněné u teleskopického provedení.

Problém je však s vysouváním konců tyčí na straně, kde se uvažuje pohyb lidských protihráčů. Zde by mohlo dojít ke zranění. V tabulce níže nejsou uvedeny vlastnosti shodné s typem fotbalu zmíněného výše (masivní ocelové nohy, rozebíratelnost, reklamní potisk, otevřená a neprůhledná hrací plocha).

Klady	Zápory
Větší hmotnost - stabilita	Mechanismu vhazování mincí
Tlustší stěna korpusu - 30mm	Dvojnásobná cena
Průchozí tyče – odstranění vůlí	Průchozí tyče – možnost úrazu
Výztuhy pod hrací plochou	

Tab. 2 Vlastnosti GARLANDO WORLD CHAMPION

### 6.1.3 Shrnutí výběru stolního fotbalu

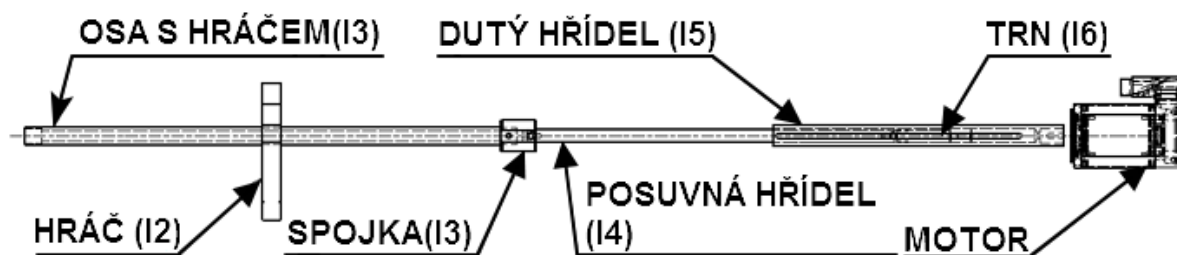
Po zkoumání těchto vlastností hracích souprav fotbalů byl vybrán Garlando G-500 EVOLUTION (Obr. 11). Tento výrobek je vhodný zejména kvůli poměru ceny a kvality provedení. Cena se pohybuje kolem 16 000 Kč, což je přibližně ve středu cenového rozpětí prodáváných hracích souprav (cena Garlando WORLD CHAMPION je přibližně 37 000 Kč). Kvalita provedení je precizní, nejsou viditelné žádné povýrobní nedostatky. Teleskopické tyče poskytují ochranu lidských hráčů před možným zraněním. Teleskopické uložení má vůli, ale v případě nutnosti bude provedena výměna kluzného ložiska za přesnější, aby došlo k přesnějšímu vymezení vůlí. Vůči konstrukci krytu na průchozí tyče je výměna kluzného ložiska snazší a levnější úprava. Neprůhledné dno hrací plochy pod pískovaným sklem bude vyměněno za desku z plexiskla z důvodu snímání scény kamerou uloženou pod stolem. Hmotnost desky navíc navýší tuhost sestavy. Absence vhazovacího mechanismu na mince sice sníží tuhost stolu, nicméně tento mechanismus je pro potřebu práce je zcela zbytečný. Chybějící mechanismus navíc sníží pořizovací cenu stolního fotbalu. Tuhost stolu lze poté dodatečně zvýšit podle potřeby v průběhu konstrukčních úprav vhodnými výztuhami. Společná negativní vlastnost otevřené hrací plochy, jež je místem možného zranění obsluhy, bude odstraněna dodatečným opatřením - krytem z plexiskla či bezpečnostním snímačem pro detekci objektů (například rukou).



Obr. 11 Vybraný stolní fotbal. [13]

## 6.2 Motor pro rotační pohyb

Nejprve bylo nutné provést výpočet momentů setrvačnosti celé soustavy  $I_s$  [kg•m<sup>2</sup>]. Soustavu tvoří jednotlivé prvky spojené s motorem rotující na společné ose. Mezi prvky patří například osa s hráči (v našem případě s brankářem), spojka, kluzná hřídel lineárního motoru, trn atd. (Obr. 13). Počítání momentu setrvačnosti složitých těles, například hráče, by bylo příliš komplikované. Proto se tvary těles zjednodušily na soustavu plných tyčí a válců s určitou tloušťkou stěny.



Obr. 13 Schéma soustavy s momenty setrvačnosti.

Celkový moment setrvačnosti je dán vztahem

$$I_s = \sum_{i=1}^6 I_i = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6 \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^2] \quad (6.5)$$

Jednotlivé složky byly podle tvaru tělesa a jeho osy rotace počítány podle odpovídajících rovnic. Moment setrvačnosti pro plný válec o poloměru  $R_i$  [m] a hmotnosti  $m_i$  [kg], jehož osa je shodná s osou rotace, byl použit pro kluznou hřídel lineárního motoru a kluzný trn (6.6).

$$I_i = \frac{1}{2} \cdot m_i \cdot R_i^2 \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^2] \quad (6.6)$$

Pro osu hráče, spojku a dutou hřídel byl použit vztah (6.7) pro tlustostěnný válec o vnějším a vnitřním poloměru  $R_i$  [m],  $r_i$  [m] a hmotnosti  $m_i$  [kg]

$$I_i = \frac{1}{2} \cdot m_i \cdot (R_i^2 + r_i^2) \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^2] \quad (6.7)$$

Moment setrvačnosti hráče byl počítán pomocí rovnice pro plný válec o hmotnosti  $m_2$  [kg] a délky  $l_2$  [m], kde osa rotace je kolmá na osu válce a prochází koncem válce (hlava hráče je zanedbatelná).

$$I_2 = \frac{1}{3} \cdot m_2 \cdot l_2^2 \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^2] \quad (6.8)$$

Po dosazení jednotlivých veličin do předchozích vztahů byly spočítány jednotlivé momenty setrvačnosti. Jejich součtem se určila hodnota momentu setrvačnosti celé soustavy těles (Tab. 3).

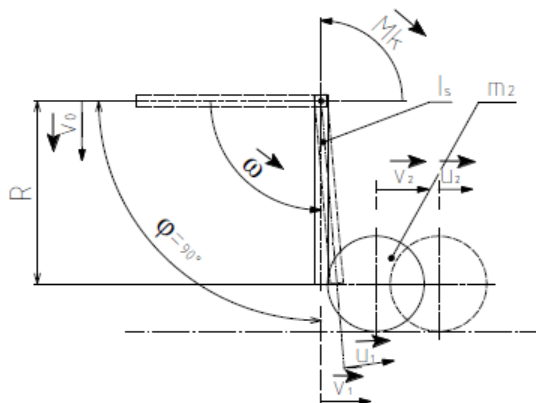
$I_i$	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$I_4$	$I_5$	$I_6$	$I_s$
[kg·m <sup>2</sup> ]	$2,3 \cdot 10^{-5}$	$9,4 \cdot 10^{-5}$	$6,5 \cdot 10^{-6}$	$4,9 \cdot 10^{-6}$	$2,6 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$

Tab. 3 Vypočítané hodnoty momentů setrvačností soustavy.

Pro přesnější specifikaci motoru vykonávajícího rotační pohyb bylo potřeba znát hodnotu kroutícího momentu motoru  $M_k$  [N·m] a jeho otáčky  $n_M$  [min<sup>-1</sup>]. Podle těchto hodnot bylo možné určit typ motoru, který bude mít kroutící moment a otáčky větší než jsou vypočítané (žádané) hodnoty.

Vycházelo se ze situace znázorněné na obrázku (Obr. 14). Výchozí poloha hráče pro odpal míčku je v poloze pod úhlem  $\varphi = 90^\circ$ . Počáteční obvodová rychlost hráče je  $v_0 = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , jeho neznámá koncová rychlost  $v_1$  [m·s<sup>-1</sup>]. Moment setrvačnosti soustavy má velikost  $I_s = 1,6 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ . Požadovaná rychlost těžiště míčku po odpalu je  $u_2 = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (počáteční rychlost je  $v_2 = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) a jeho hmotnost je  $m_2 = 0,02 \text{ kg}$ . Při výpočtech byla zanedbána rotace míčku. Uvažoval se jen jeho posuvný pohyb. Vzdálenost míčku od osy otáčení soustavy s hráčem má velikost  $R = 0,075 \text{ m}$ . Úkolem je vypočítat

velikost momentu  $M_k$  [N·m] takovou, aby míček po odpalu měl požadovanou rychlost.



Obr. 14 Schéma odpalu míčku.

Vycházelo se z rovnosti momentu hybnosti před (index 1) a po srážce (index 2) hráče a míčku uvedené v rovnici

$$L_1 = L_2 \quad (6.9)$$

kde momenty hybností  $L_1$ ,  $L_2$  [ $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ] těles bylo možné rozepsat následujícím způsobem se zavedením úhlové rychlosti hráče před srážkou  $\omega_h$  [ $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ] a po srážce  $\omega_h^1$  [ $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ].

$$L_1 = I_s \cdot \omega_h \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (6.10)$$

$$L_2 = I_s \cdot \omega_h^1 + m_2 \cdot u_2 \cdot R \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (6.11)$$

Substitucí výrazů (6.10) a (6.11) do (6.9) se získala výsledná rovnice

$$I_s \cdot \omega_h = I_s \cdot \omega_h^1 + m_2 \cdot u_2 \cdot R \quad (6.12)$$

Pro usnadnění výpočtu byl převeden moment setrvačnosti soustavy s hráčem  $I_s$  na odpovídající hmotnost bodu  $m_1$  [kg], kde  $R$  [m] je vzdálenost bodu o osy otáčení.

$$m_1 = \frac{I_s}{R^2} \quad [\text{kg}] \quad (6.13)$$

Dosazením vztahu (6.13) do (6.12) a užitím vztahu pro obvodovou rychlost ( $v = \omega \cdot R$  [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]), bylo možné přepsat rovnici do následující podoby

$$m_1 \cdot v_1 = m_1 \cdot u_1 + m_2 \cdot u_2 \quad (6.14)$$

kde  $m_1$ ,  $m_2$  a  $u_2$  jsou známé veličiny. Pro určení dvou neznámých rychlostí  $v_1$  a  $u_1$  hráče bylo nutné získat jednu další rovnici o dvou stejných neznámých.

Následující rovnice definuje koeficient restituce  $\varepsilon$  [ ], který udává poměr relativních rychlostí dvou těles před srážkou ku relativní rychlosti po srážce.

$$\varepsilon = \frac{u_2 - u_1}{v_1 - v_2} = \frac{u_2 - u_1}{v_1} \quad [] \quad (6.15)$$

V (6.15) se koeficient restituce  $\varepsilon$  určil pomocí experimentu. Na podložku ze stejného materiálu jako je hráč (MOPLen) se uvolnil míček (PolyEtylen) z počáteční výšky  $h_0$  [m] a následně

se zaznamenala výška po odrazu  $h_1$  [m] míčku od podložky. Dle vztahu (6.16) se spočítal koeficient restituace, jehož výsledná hodnota je 0,57.

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{h_1}{h_0}} \quad [] \quad (6.16)$$

Při známém koeficientu  $\varepsilon$  bylo možné z rovnice (6.15) vyjádřit rychlost hráče po odpálení  $u_1$  a tato rovnice rychlosti se dosadila do (6.14). Úpravou byl získán vztah pro výpočet obvodové rychlosti hráče před srážkou  $v_1$ .

$$v_1 = \frac{u_2 \cdot (m_1 + m_2)}{m_1 \cdot (1 + \varepsilon)} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (6.17)$$

Kde po dosazení příslušných hodnot byla vypočítána výsledná hodnota rychlosti  $v_1 = 9,8 m \cdot s^{-1}$  a po srážce hráče s míčkem byla určena teoretická obvodová rychlost hráče  $u_1 = 2,7 m \cdot s^{-1}$ . Při přepočtu na úhlovou rychlost byla stanovena velikost její hodnoty před srážkou  $\omega_h = 130,7 \text{ rad} \cdot s^{-1}$  a po srážce  $\omega_h^* = 36 \text{ rad} \cdot s^{-1}$ .

Ze známé úhlové rychlosti hráče před srážkou šlo spočítat otáčky motoru  $n_M$  [ $\text{min}^{-1}$ ]. Vyjádřením otáček ze vztahu (6.18) a dosazením příslušných hodnot se získala velikost otáček motoru  $n_M = 1387,5 \text{ min}^{-1}$ .

$$\omega_h = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_m}{60} \quad [rad \cdot s^{-1}] \Rightarrow n_m = \frac{60 \cdot \omega_h}{2 \cdot \pi} \quad [min^{-1}] \quad (6.18)$$

Pro získání hodnoty hnacího momentu (potřebný pro získání vypočítané úhlové rychlosti) se využilo druhé impulsové věty, kde se impuls momentu  $L$  [ $N \cdot m \cdot s$ ] rovná změně momentu hybnosti  $\Delta b$  [ $kg \cdot m^2 \cdot rad \cdot s^{-1}$ ].

$$L = \Delta b \quad (6.19)$$

Rychlost změny momentu hybnosti  $\Delta L$  je definována součinem momentu  $M_k$  [ $N \cdot m$ ] a změny času  $\Delta t$  [s].

$$L = M_k \cdot \Delta t \quad [N \cdot m \cdot s] \quad (6.20)$$

Změna momentu hybnosti je rovna součinu momentu setrvačnosti celé soustavy  $I_s$  [ $kg \cdot m^2$ ] a změně úhlové rychlosti  $\Delta \omega$  [ $rad \cdot s^{-1}$ ].

$$\Delta b = I_s \cdot \Delta \omega \quad [kg \cdot m^2 \cdot rad \cdot s^{-1}] \quad (6.21)$$

Dosazením (6.20) a (6.21) do vztahu (6.19) vznikla rovnice pro moment motoru.

$$M_k = \frac{I_s \cdot \Delta \omega}{\Delta t} \quad [N \cdot m] \quad (6.22)$$

Pro počáteční podmínky  $t_0 = 0s$ ,  $\omega_0 = 0 \text{ rad} \cdot s^{-1}$  byla změna úhlové rychlosti  $\Delta \omega = \omega_h - \omega_0 = \omega_h$  [ $rad \cdot s^{-1}$ ] a změna času  $\Delta t = t - t_0 = t$  [s]. Konečný vztah pro hnací moment motoru potřebný pro získání dané úhlové rychlosti z klidu při daném momentu setrvačnosti tělesa za čas  $t$  [s] je dán rovnicí

$$M_k = \frac{I_s \cdot \omega_h}{t} \quad [N \cdot m] \quad (6.23)$$

Potřebný čas  $t$  [s] se získal z rovnic (6.24) a (6.25) rovnoměrně zrychleného pohybu po kružnici.

$$\varphi = \frac{1}{2} \cdot \alpha \cdot t^2 \quad [rad] \quad (6.24)$$

$$\omega = \alpha \cdot t \text{ [rad} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (6.25)$$

Kde je  $\varphi$  [rad] úhlové natočení,  $\alpha$  [rad $\cdot$ s $^{-2}$ ] úhlové zrychlení a  $\omega$  [rad $\cdot$ s $^{-1}$ ] úhlová rychlost. Vyjádřením času z rovnice (6.25) a jeho následnou substitucí do vztahu (6.24) lze vyjádřit úhlové zrychlení dané rovnicí (6.26). Po dosazení spočítaných hodnot vyšla velikost zrychlení  $\alpha = 6720,2 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-2}$ .

$$\alpha = \frac{\omega^2}{2 \cdot \varphi} \text{ [rad} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (6.26)$$

Při známém úhlovém zrychlení šlo využít rovnici (6.25) pro výpočet času. Výsledná hodnota vyšla  $t = 0,02 \text{ s}$  a při dosazení do rovnice pro hnací moment (6.23) byla dopočítána hodnota  $M_k = 1,2 \text{ N} \cdot \text{m}$ . Tabulka č. 4 informuje hodnotami, které určí bližší specifikaci rotačního motoru.

Moment setrvačnost soustavy s hráčem	$I_s$ [kg $\cdot$ m $^2$ ]	$1,6 \cdot 10^{-4}$
Vzdálenost dotyku hráče s míčkem	$R$ [m]	0,075
Hmotnost míčku	$m_2$ [kg]	0,02
Rychlost těžiště míčku	$u_2$ [m $\cdot$ s $^{-1}$ ]	10
Úhlová vzdálenost mezi hráčem a míčkem	$\varphi$ [rad]	1,57
Čas otočení hráče pro odpal	$t$ [s]	0,02
Obvodová rychlost hráče před srážkou	$v_1$ [m $\cdot$ s $^{-1}$ ]	10,9
Úhlová rychlost hráče před srážkou	$\omega_h$ [rad $\cdot$ s $^{-1}$ ]	145,3
Úhlové zrychlení hráče	$\alpha$ [rad $\cdot$ s $^{-2}$ ]	6720,2
Výsledný hnací moment	$M_k$ [N $\cdot$ m]	1,2

Tab. 4 Potřebné hodnoty pro rotační motor.

### 6.2.1 Shrnutí výběru rotačního motoru

V tabulce č. 5 je uvedena nabídka synchronních servo motorů vybraných výrobců na trhu. Výrobce Festo nabízí motor s přibližně stejným jmenovitým momentem, avšak s daleko větším výkonem a otáčkami než například výrobce Omron. Servo motor od společnosti B&R s jmenovitými otáčkami 3000 min $^{-1}$  lze, dle zjištěných informací, pořídit za stejnou cenu jako motor s otáčkami 1500 min $^{-1}$ . Typ 8LVA23.B1030D100-0 má sice menší jmenovité hodnoty než motor od společnosti Festo, ale i tak je svými parametry postačující pro účely této aplikace. Navíc použití servo motoru od firmy B&R bude výhodnější z hlediska toho, že motor bude připojen k řídicímu systému stejného výrobce.

Výrobce	Typ	Výkon [W]	Otáčky [min $^{-1}$ ]	Moment [N $\cdot$ m]
Omron	R88D-GN04H	400	3000	1,3
Siemens	1FK7033-7AF21-1JA0	400	3000	1,2
Festo	EMMS-AS-70-S-HS-RR	866	5300	1,4
B&R	8LVA23.B1015D100-0	209	1500	1,3
B&R	8LVA23.B1030D100-0	408	3000	1,4

Tab. 5 Přehled nabízených servo motorů.

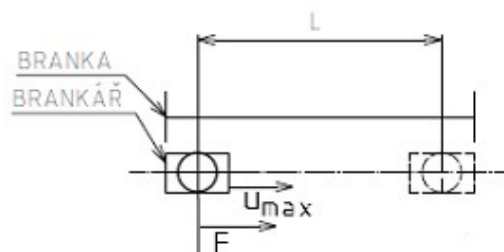
Na základě předchozí analýzy bylo zvolen servo motor od firmy B&R s nominálním momentem  $1,3 \text{ N}\cdot\text{m}$  a jmenovitými otáčkami  $3000 \text{ min}^{-1}$ . Jmenovaný třífázový synchronní motor disponuje drážkou pro pero, která bude využita pro účely konstrukce. Detailní výpis charakteristických veličin motoru je uveden v následující tabulce č. 6.

Nominální otáčky	$n_n [\text{min}^{-1}]$	3000
Maximální otáčky	$n_{\max} [\text{min}^{-1}]$	6600
Nominální moment	$M_n [\text{N}\cdot\text{m}]$	1,33
Maximální moment	$M_{\max} [\text{N}\cdot\text{m}]$	4
Nominální proud	$I_n [\text{A}]$	5,8
Maximální proud	$I_{\max} [\text{A}]$	20,7
Hmotnost bez brzdy	$m [\text{kg}]$	1,39
Nominální výkon	$P_n [\text{W}]$	408

Tab. 6 Štítkové hodnoty rotačního motoru. [7]

### 6.3 Motor pro posuvný pohyb

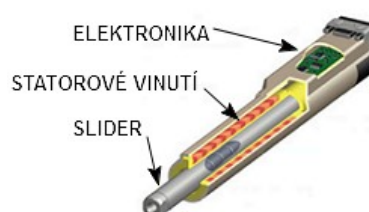
Při volbě lineárního motoru se vycházelo z pokusu provedeného s osou brankáře. Pokus spočíval v co nejrychlejším přemístění brankáře na vzdálenost mezi dorazy (vzdálenost pokrývající branku), jejíž velikost je  $L = 0,17 \text{ m}$ . Změřený čas, za který lidská síla přemístila brankáře do cílové polohy je  $t_p = 0,14 \text{ s}$ .



Obr. 15 Schéma situace posuvu brankáře.

Cílem je zvolit takový lineární motor, který při stejné vzdálenosti přemístí brankáře do krajní polohy za kratší čas než lidský hráč.

Společnost NTI AG nabízí lineární motory pod obchodní značkou LinMot®, které pro pohyb využívají elektromagnetické pole. Posuv tedy není prováděn mechanickými členy, jako jsou například ozubená kola a řemeny, ale pomocí elektromagnetických sil. Motor se skládá pouze ze dvou částí. První částí je stator, který obsahuje vinutí, jímž prochází proud. Druhou složkou je pohyblivé jádro (posuvná hřídel, „Slider“). Slider je tvořen neodymovými magnety, které jsou usazené v ocelové tyči. Hřídel je kluzně uložena ve statoru (Obr. 16).



Obr. 16 Schéma lineárního motoru LinMot®. [14]

Při výběru lineárního motoru se napřed vybraly typy motorů z tříd, dělených podle velikostí sil, splňující svým zdvihem rozsah posunu brankáře. Při známé síle motoru  $F_m$  [N] a hmotnosti celé soustavy s brankářem společně s hřídelí  $m_s$  [kg] se dopočítalo maximální zrychlení  $a$  [ $m \cdot s^{-2}$ ] s jakým mohou jednotlivé statory působit na soustavu s brankářem.

$$a = \frac{F_m}{m_s} [m \cdot s^{-2}] \quad (6.27)$$

Dále se využil vztah pro okamžitou rychlost  $v$  [ $m \cdot s^{-1}$ ] rovnoměrně zrychleného přímočarého pohybu (6.28), ze kterého se vyjádřil čas  $t_{vmax}$  [s] pro dosažení maximální rychlosti  $v_{max}$  [ $m \cdot s^{-1}$ ] dané výrobcem motoru (6.29). V tomto čase také dochází k brzdění motoru z maximální rychlosti na nulovou. Počáteční rychlost je  $v_0$  [ $m \cdot s^{-1}$ ].

$$v = v_0 + a \cdot t_{vmax} [m \cdot s^{-1}] \quad (6.28)$$

$$t_{vmax} = \frac{v_{max}}{a} [s] \quad (6.29)$$

Vyjádřením času z rovnice rychlosti pro rovnoměrně přímočarý pohyb (6.30) šlo určit dobu  $t_{vconst}$  [s], po kterou se soustava s brankářem pohybuje konstantní maximální rychlostí. Přesněji mezi úseky se zrychlením na maximální rychlost, resp. zpomalením na nulovou rychlost.

$$v_{max} = \frac{s}{t_{vconst}} [m \cdot s^{-1}] \Rightarrow t_{vconst} = \frac{s}{v_{max}} [s] \quad (6.30)$$

Dráhu  $s$  [m] bylo možné dopočítat pomocí rovnice (6.31), ve které neznámá  $s_x$  [m] šla určit rovnicí pro dráhu rovnoměrně zrychleného přímočarého pohybu (6.32), což jsou úseky se zrychlením a brzděním brankáře. Tyto úseky se poté odečty od celkové délky  $L$  [m], kterou musí těleso urazit.

$$s = L - (2 \cdot s_x) [m] \quad (6.31)$$

$$s_x = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t_{vmax}^2 [m] \quad (6.32)$$

Celkový čas  $t_c$  [s] se spočítal jako součet času pro úsek, kdy je rychlost konstantní s úseky, kdy rychlost roste respektive klesá.

$$t_c = t_{vconst} + (2 \cdot t_{vmax}) [s] \quad (6.33)$$

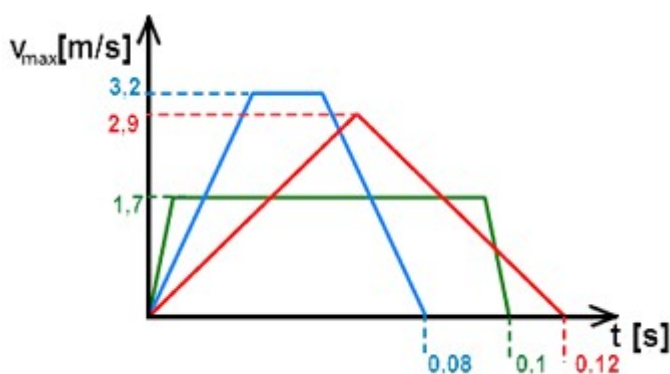
Vypočítané hodnoty jsou zapsány níže (Tab. 7). Při výpočtu času pro typ motoru P01-23x80/210x270 nešlo uvažovat lichoběžníkový průběh rychlosti jako u zbývajících typů.

Typ motoru	P01-23x80/210x270	P01-37x120/180x260	P01-48x240/30x180
Síla $F$ [N]	44	163	585
Hmotnost zátěže $m_s$ [kg]	0,9	1,4	2,5
Maximální zrychlení $a$ [ $m \cdot s^{-2}$ ]	48,9	117,1	234
Maximální rychlost $v_{max}$ [ $m \cdot s^{-1}$ ]	2,9	3,2	1,7
Celkový čas $t_c$ [s]	0,12	0,08	0,1

Tab. 7 Srovnání různých typů lineárních motorů LinMot®.[14]



Motor se silou  $F = 44 \text{ N}$  není schopen vyvinout takové zrychlení, aby na limitujícím časovém úseku  $t = 0,14 \text{ s}$  dosáhl nominální rychlosti danou výrobcem  $v_n = 6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Proto se spočítal výsledný čas pro průběh rychlosti, který má tvar rostoucí a klesající přímky. Soustava s brankářem tedy zrychluje do poloviny dráhy a poté hned zpomaluje. Výsledná maximální rychlost těsně před tím než soustava začne zpomalovat je  $v_{\max} = 2,9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , což je skoro polovina nominální rychlosti. Dále si lze všimnout lineárního motoru se silou  $F = 163 \text{ N}$ , který již dosáhne na daném úseku maximální rychlosti a zvládne přesunout zátěž za  $0,08 \text{ s}$ . To je při téměř čtyřnásobné síle o 4 setiny sekundy méně, než u prvního typu. Třetí typ motoru se silou  $F = 585 \text{ N}$  urazí daný úsek za dobu o pouhé dvě setiny sekundy kratší než první typ motoru a to při zhruba třinácti násobku síly. Tento motor je navíc pomalejší než druhý typ motoru. Je to dáno nárůstem hmotnosti posuvné hřídele, se kterou roste i hmotnost zátěže. Výsledné průběhy rychlostí jsou vykresleny na obr. 17.



Obr. 17 Teoretické průběhy rychlostí.

Průběhy rychlostí na obr. 17 jsou pouze teoretické. Reálné průběhy se budou lišit tvarem křivek. Ostré nástupy, přechody křivek budou mít podoby oblých, plynule přecházejících přechodů.

### 6.3.1 Shrnutí výběru lineárního motoru

Po analýze vlastností vybraných typů lineárních motorů byl vybrán pohon z nejnižší třídy s označením P01-23x80/210x270, jehož síla je  $F = 44 \text{ N}$  a zdvih při maximální síle je  $L_s = 210 \text{ mm}$ . Tento motor nedosahuje jeho nejvyšší možné rychlosti a má z vybraných typů největší čas na přesun soustavy těles s brankářem. Čas přesunu je i tak kratší, než například v diplomové práci p. Myslivce (viz. [5]). Převzato na osu s brankářem by při jeho návrhu pohonů trval přesun brankáře do cílové pozice  $0,25 \text{ s}$ , což je zhruba dvojnásobek času zvoleného typu motoru. V poslední řadě je třeba zdůraznit cenu tohoto typu, která je o více jak  $10\,000 \text{ Kč}$  nižší než lineární motory z vyšších tříd, přitom tyto motory nejsou razantně rychlejší od prvního typu. Štítkové hodnoty zvoleného lineárního motoru jsou uvedené v následující tabulce č. 8.

Standartní zdvih	$S_s [\text{mm}]$	210
Maximální síla	$F [\text{N}]$	44
Maximální proud	$I_{72\text{VDC}} [\text{A}]$	4
Maximální rychlost	$v_{72\text{VDC}} [\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$	6
Průměr hřídele	$d [\text{mm}]$	12
Délka hřídele	$L_h [\text{mm}]$	350
Hmotnost hřídele	$M_h [\text{kg}]$	0,27
Hmotnost motoru	$M_m [\text{kg}]$	0,53

Tab. 8 Štítkové hodnoty lineárního motoru. [14]

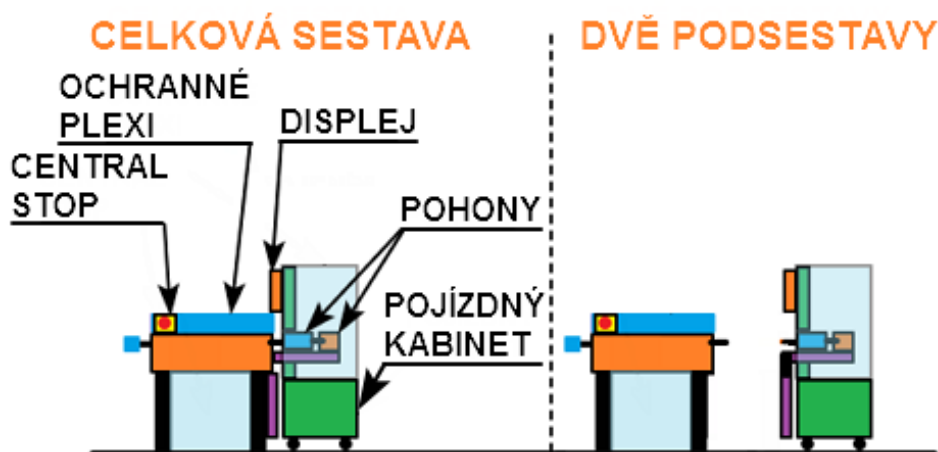


## 7 KONSTRUKCE ROBOTICKÉHO FOTBALU

Kapitola popisuje nutné konstrukční zásahy do konstrukce fotbalu a také návrhy nových dílů koncipovaných tak, aby byly vytvořeny co nejlepší podmínky pro chod robotického fotbalu. Odstavce níže nejprve zmiňují vize, představy o mechanickém uspořádání jednotlivých komponent. Poté následují oddíly popisující konkrétní úpravy a rozložení součástí robotického fotbalu (z nichž některé byly nakoupeny a některé vyrobeny).

### 7.1 Idea řešení konstrukce

Před vlastními úpravami stolního fotbalu a řešením umístění pohonů, popřípadě řídicího systému, bylo nutné si stanovit několik základních priorit. Prvním hlediskem bylo provést úpravy na stolním fotbalu tak, aby po odpojení celého systému zůstal fotbálek v co nejvíc původním stavu. Bylo to z důvodu, aby lidští hráči při angažmá proti robotu měli co nejvíc podobné podmínky pro hraní, jako kdyby hráli na standardním herním stole.



Obr. 18 Idea konstrukce robotického fotbalu.

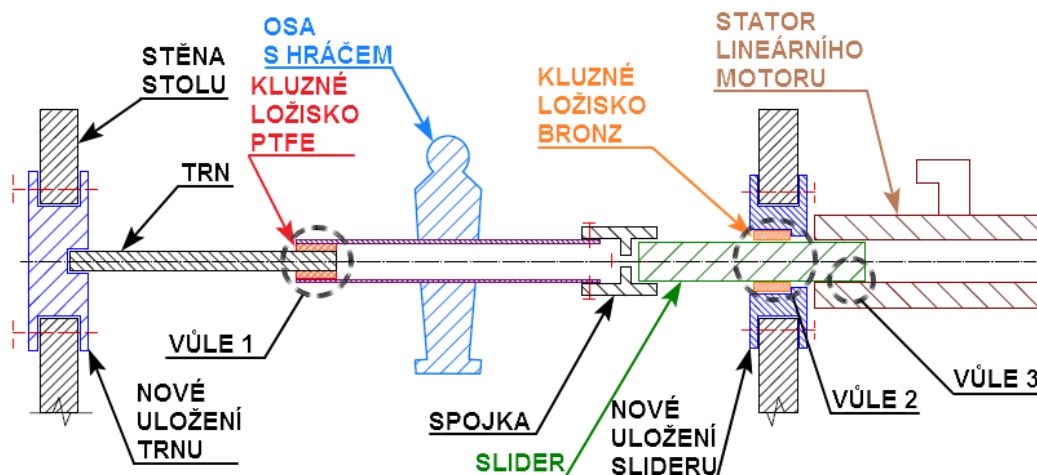
Druhou stanovenou podmínkou byla a je rozebiratelnost celého zařízení. To znamená snadná schopnost manipulace pro přemísťování (po podniku, na výstavě, skrze dveřní rám). Řešení tohoto problému bylo vymyšleno tak, že celá uvažovaná sestava zařízení bude v případě přemísťování rozdělena na dvě menší podsestavy (Obr. 18). První sestavou bude upravený stůl a druhou bude pojízdný kabinet s pohony, řídicím systémem a kamerou. Výhodnou pojízdného kabinetu je schopnost pojmout veškeré prvky nutné pro činnost zařízení a jeho mobilita.

Třetí prioritou byla bezpečnost zařízení. Celé zařízení bude obsahovat pasivní i aktivní bezpečnostní prvky (plexiskla, optické mříže, stop tlačítka), které zajistí dostatek bezpečí pro lidskou obsluhu. V laboratorních podmínkách budou příslušné osoby poučeny o zásadách přístupu ke stroji a možných rizicích zranění. Pro případ veřejného použití (výstavy) bude doporučeno mít zajištěn nepřetržitý dohled minimálně jedné poučené osoby, která bude dohlížet na bezpečné používání robotického fotbalu.

Posledním hlediskem byl ohled na celkovou tuhost, váhu a design zařízení. Jelikož jedním z použití tohoto projektu je i reprezentace firmy na výstavách, bylo nutné zohlednit celkový vzhled robotického fotbalu, popřípadě pro lidské hráče zajistit jistou interaktivitu s autonomním systémem. Řešení může být například pomocí dotykového displeje, který bude informovat o stavu hry, nebo bude moci nabídnout určitá nastavení systému. Tuhost konstrukce zároveň s ohledem na nízkou hmotnost bude zaručena použitím standardních (stavebnicových) hliníkových profilů. Profily poskytují širokou variabilitu pro sestavení různých konstrukcí. Díly vyráběné na míru, zejména pohyblivé části, budou taktéž vyráběné z hliníkových slitin. Díly ze slitin hliníku sníží setrvačnost pohybů a tím pomohou zlepšit celkovou dynamiku zařízení.

## 7.2 Úpravy původního stolního fotbalu

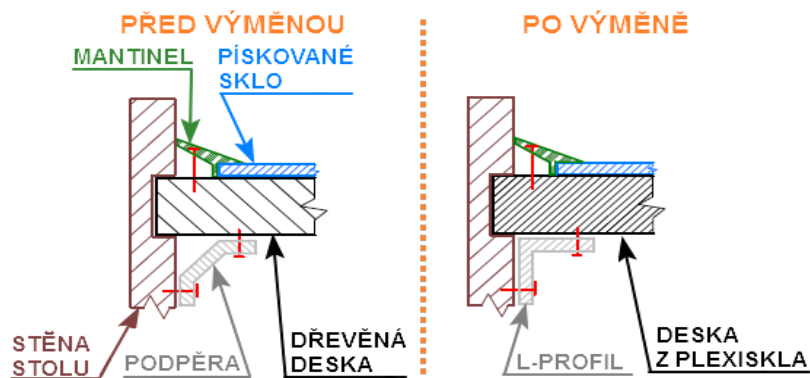
Na začátku byl k dispozici standardní stolní fotbálek od firmy Garlando. Skládá se ze osmi hracích os. Přičemž každému týmu přísluší 4 osy. Tyto osy jsou uloženy v kuličkových ložiscích, jejichž vnitřní prstenec je vyroben z nylonu. Ložisko je schopno přenášet otáčivý pohyb se zatížením pomocí mezikruží s kuličkami. Pro posuvný pohyb osy slouží právě nylonový prstenec. Má sice dobré kluzné vlastnosti, ale při detailním zkoumání byly zjištěny příliš velké vůle mezi osou a tímto prstencem. Značné vůle by byly škodlivé pro kluzné uložení slideru ve statoru lineárního motoru (došlo by k opotřebení jádra motoru). I kluzný spoj mezi trnem a dutou hřídelí teleskopického uložení vykazoval značnou vůli a dokonce docházelo i ke vzpříčení a zadrhnutí uložení.



Obr. 19 Schéma popisu osy a vůlí.

Aby se zabránilo opotřebení jádra lineárního motoru, bylo zapotřebí snížit vůle (na obr. 19 vůle 1 a 2), tak aby tyto dvě vůle byly menší než vůle mezi statorem a sliderem (obr. 19 vůle 3). Proto se muselo navrhnout uložení nové, které navíc bude zabráňovat vzpříčení trnu a osy. Využilo se původního trnu, duté osy a koupeného slideru lineárního motoru. Pro tyto části se navrhly změny ve třech uloženích. První uložení ve stěně fotbálku místo stávajícího pro trn. Druhé uložení mezi trnem a dutou hrací osou. Poslední návrh změny uložení se provedl pro hřídel lineárního motoru v protější stěně fotbálku. Místo původních ložisek (kluzná, kuličková) se aplikovala kluzná ložiska. Dvojice nových ložisek svými materiály (bronz a PTFE) vyhovují z hlediska uvažované rychlosti (až  $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ), své bezúdržbovosti, samomaznosti a suchému chodu. Nebude tedy potřeba přimazávat ložiska, tím se zachová čistota v prostoru hrací plochy (Obr. 19).

Další velmi podstatnou úpravou stolu byla výměna dřevotřískové desky. Tato deska se nacházela pod pískovaným sklem a plnila funkci podpěry pro sklo. Protože cílem bude snímat polohu míčku kamerou umístěnou pod stolem, bylo nutné tuto desku vyměnit za vhodnou variantu. Nabízelo se transparentní obyčejné sklo, plexisklo nebo polykarbonát. Obyčejné sklo má nevýhodu velké hmotnosti, amorfního charakteru a dražšího zpracování. Plexisklo má nižší hmotnost, lepší zpracovatelnost a disponuje lepší odolností proti poškrábání. Polykarbonát je z těchto materiálů nejměkčí, je dobře houževnatý, má však horší odolnost proti otěru. Polykarbonát je dražší než plexisklo, sklo je nejdražší kvůli zpracování. Po zkoumání těchto vlastností byla navržena deska z transparentního plexiskla o stejných rozměrech jako deska původní. K prasknutí plexiskla nedojde, protože rázové tlaky způsobené odpaly míčku se rozdělí do celé plochy pískovaného skla. Bylo také nutné vyměnit původní ocelové podpěry, které byly umístěny po delších stranách desky v celkovém počtu 8 kusů. Podpěry se nahradily profilem ze slitiny hliníku s délkou, která je stejná jako rozměr delší strany desky. Tím je zajištěna podpora pro desku v celé její délce, což odstraňuje možnost nepatrných průhybů desky. Při dané tloušťce skla 15 mm nebude docházet k průhybům desky nepodpírané na kratší straně vyměněné desky s plexiskla (Obr. 20).

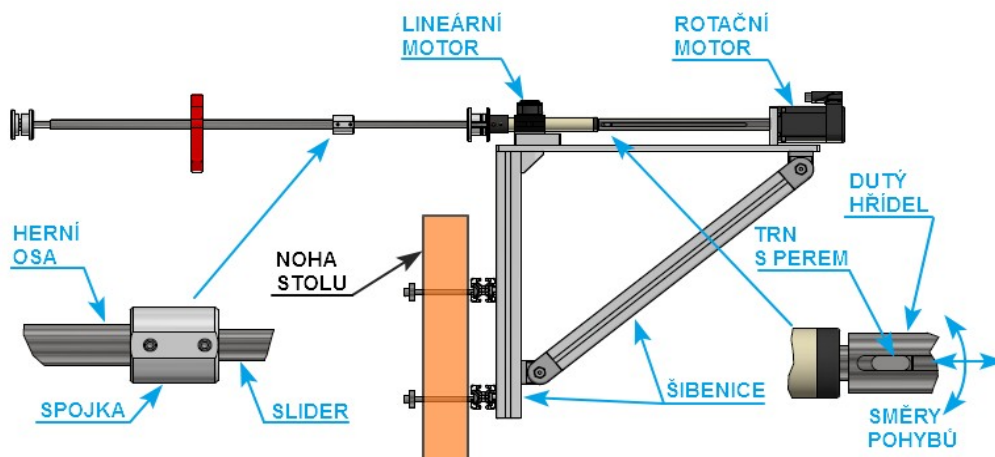


Obr. 20 Schéma výměny desky a podpěry.

Poslední menší úpravou bylo vyvrtání otvorů do noh stolu pro šrouby, nacházející se na straně autonomního systému. Pomocí těchto otvorů se přichytí část zařízení ke stolu. Dojde tak k pevnému spojení, které nám zajistí přesné uchycení k osám s hráči a zvýší tuhost uložení pohonů. Kdyby uložení pohonů zůstalo spojené s vozíkem, nebyla by zaručena stoprocentní stabilita vozíku. Rychlými a kmitavými pohyby pohonů by tak mohlo dojít k posouvání pojízdného kabinetu.

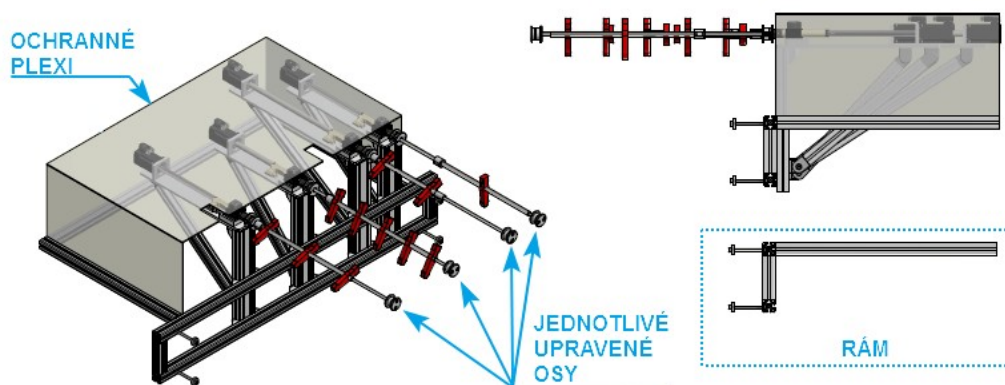
### 7.3 Umístění a konstrukce uložení pohonů

Základní částí pro umístění lineárního a rotačního motoru je pravoúhlé spojení dvou hliníkových profilů s podpěrou („šibenice“). Na vrchní část šibenice se umístila deska s přírubou pro rotační motor a uložnou deskou pro lineární motor. Umístění motorů na jedné desce zajistilo potřebnou sousost obou jednotek, kterou se snížila nepřesnost a tření mezi pohybujícími se částmi. Na rotační servomotor se navrhla dutá hřídel s drážkou pro pero. V této hřídeli bude vykonávat posuvný i rotační pohyb trn s perem (Obr. 21 vpravo dole). Trn je klíčovým prvkem, protože umožňuje přenášet rotační pohyb a zároveň se dokáže posouvat s hřídelí lineárního motoru. Na protějším konci slideru lineárního motoru se vyrobila spojka, která spojuje slider s herní osou. Herní osa je ve výsledku schopna pomocí této konstrukce konat jak rotační, tak i posuvný pohyb.



Obr. 21 Schéma uložení pohonů.

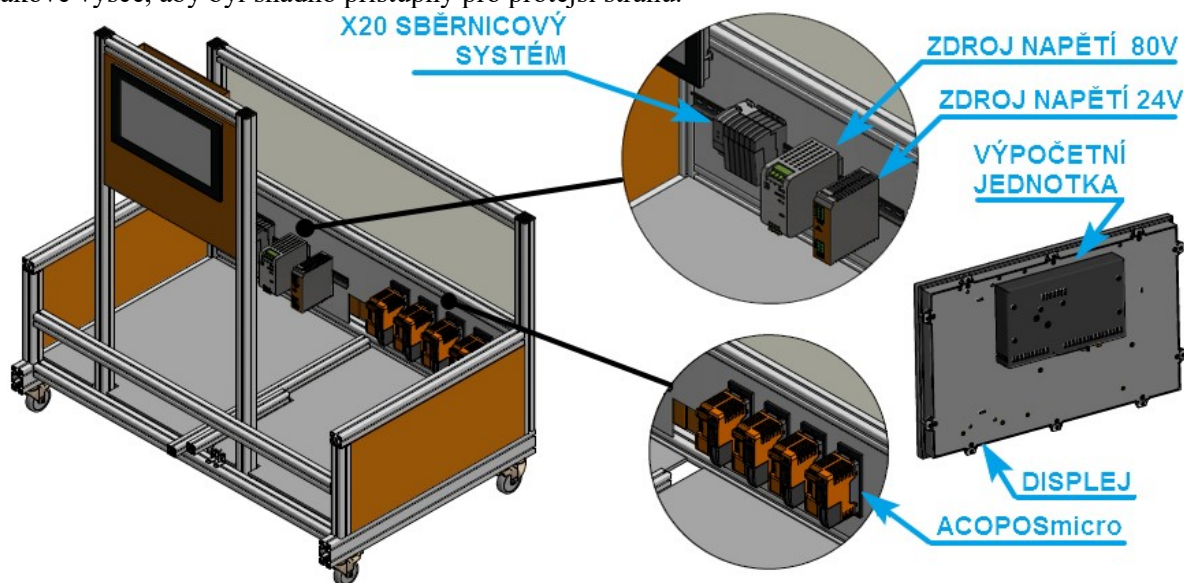
Tento celek s pravoúhlou konstrukcí je (do budoucna s dalšími třemi kusy) umístěn na rámovém nosníku. Tento nosník je při provozu robotického fotbalu pevně spojen se stolem pomocí šroubů v předvrtaných otvorech. V případě manipulace s fotbálkem se celá konstrukce uvolní a pevně se uloží na pojízdný kabinet. Vrchní část, kde se nacházejí pohony bude zakryta transparentním plexisklem. Plexisklo poslouží jako bezpečnostní ochrana a zároveň nabídne pohled na pracující motory (Obr. 22).



Obr. 22 Celkové řešení umístění pohonů.

#### 7.4 Návrh pojízdného kabinetu

Pojízdný kabinet (Obr. 23) bude sloužit pro umístění ostatních prvků robotického fotbalu. Zejména se jedná o řídicí systém, svorkovnice pro vstupy/výstupy motorů a ostatních senzorů, v poslední řadě také pro elektrický rozvaděč. Dalším úkolem kabinetu je zajistit mobilitu při odpojení od stolního fotbalu. Pro snazší přepravu vozíku je jeho konstrukce navržena z lehkých hliníkových profilů a opatřena koly s brzdami. Nosnost konstrukce počítá i se zátěží od rámu s motory, který se na vozík usadí a spojí v případě rozpojení robotického fotbalu. Stěny kabinetu jsou navrženy z neprůhledných výplní, které znemožní přístup nepovolaným osobám do vnitřního prostoru vozíku. Ve výšce 1,5 m nad hlavní částí kabinetu je navržena plocha, která je tvořena výplní z desek. Do této výplně je vytvořen otvor pro uchycení informačního panelu. Displej je umístěn co nejblíže ke stěně fotbalu v takové výšce, aby byl snadno přístupný pro protější stranu.



Obr. 23 Sestava pojízdného kabinetu.

Do zadní strany displeje je integrována výpočetní jednotka, vykonávající nutné programy pro chod robotického fotbalu. Mezi tyto programy patří například herní algoritmus se strategií hraní, zpracovávání dat z průmyslové kamery, zpracování dat ze svorkovnice a řízení pohonů.

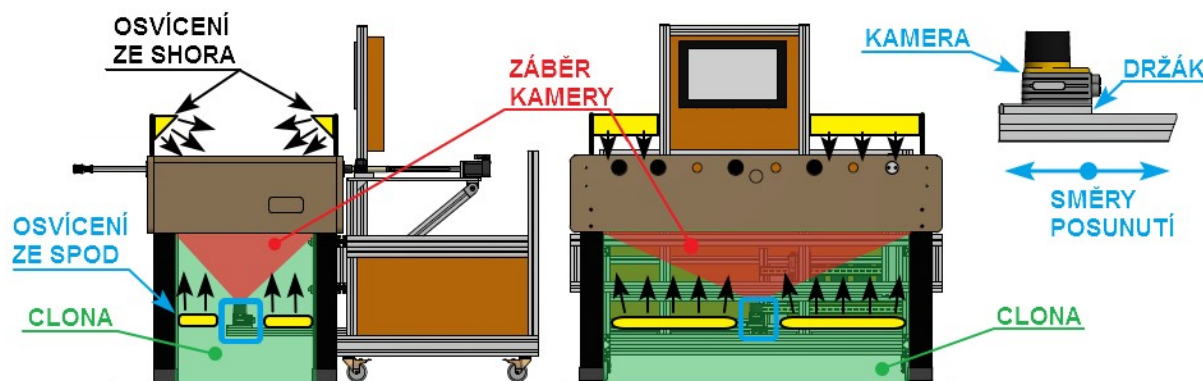
V zadní části kabinetu je umístěna hliníková stěna, sloužící pro přichycení zdrojů, vstupně/výstupních modulů a frekvenčních měničů. Stěna je umístěna tak, aby byl kolem ní dostatek místa pro montáž a připojování napájecích a komunikačních kabelů. Prostorné okolí tohoto místa zároveň zaručuje dostačující pasivní chlazení při provozu zařízení.



## 7.5 Koncepce umístění kamery a osvětlení

Umístěním kamery pod stůl se zabrání problémům při snímání herní plochy, jako jsou například překrývání míčku osami s hráči a nestabilní osvětlení snímaného prostoru. Pro vytvoření stabilních podmínek pro snímání se prostor pod stolem zakryl deskami z plného materiálu, které se přichytily k nohám stolu. Takto se vytvořilo stabilní tmavé prostředí, které kameře usnadní detekci míčku.

Pozice kamery je uvažována v co nejdelší možné vzdálenosti od plexiskla hrací desky, tak aby s vhodně nastaveným objektivem byla schopna zachytit širokoúhlý záběr snímaného prostoru. Kamera je přichycena k držáku. Úchyt kamery je umístěn na konci vysouvajícího se ramena, které se zasouvá a vysouvá z pojízdného kabinetu. Takto je možné podle potřeby kameru schovat (zasunout) při odpojení a manipulaci s vozíkem. Při opětovném připojení vozíku ke stolu opět kameru vysunout na rameni z profilu a snímat plochu.



Obr. 24 Umístění kamery a osvětlení.

Pro stabilní podmínky detekce míčku na hrací ploše je navrženo doplňující osvětlení (Obr. 24). Zdroje světla způsobí zvýšení kontrastu snímaného obrazu. Umístění světelných zdrojů zásadně ovlivní podmínky detekce. Pokud se osvětlení umístí nad hrací plochou, kamera se nastaví na detekci tmavého obrazce (podobný plné elipse), který vytvoří stín míčku. Může se zde vyskytnout problém se stíny od os s hráči, které mohou překrýt stín míčku. Kamera v tomto případě nemusí detekovat pozici míčku. Tento problém však závisí na výšce upevnění světel od hrací plochy. Řešením může být úprava v programu pro zpracování obrazu, která kameře uloží poslední známou pozici míčku. V okolí této pozice by si pak kamera mohla vytvořit pole, ve kterém by očekávala znovuobjevení míčku. Druhým řešením je umístění osvětlení pod stůl zpoza kamery. Inteligentní kamera by poté hledala nejsvětlejší bod na snímané ploše a nedocházelo by k překrytí stínů os a míčku.

Současně při úvaze umístění osvětlení bylo testováno nasvícení plochy ze shora běžně dostupnými LED pásky, umístěnými v hliníkových profilech s mléčným sklem. Mléčné sklo slouží k rozptýlení světelných paprsků jdoucích z jednotlivých zdrojů (LED diody), což ve výsledku způsobuje dojem jednotného zdroje světla. Bez skla by se nasvítily míčky jednotlivými LED diodami, takže by míček vrhal několik stínů namísto jednoho. Avšak tyto konvenční LED pásky svým světelným tokem přibližně 1400 lm nebyly schopny dostatečně nasvítit snímanou plochu. Proto byla upřednostněna světla pro průmyslové vidění, která mají podobnou velikost výkonu, ale daleko větší svítivost (například 5000 lm). Konečné umístění a typ průmyslových osvětlení pro kameru je popsán v kapitole konstrukční realizace.

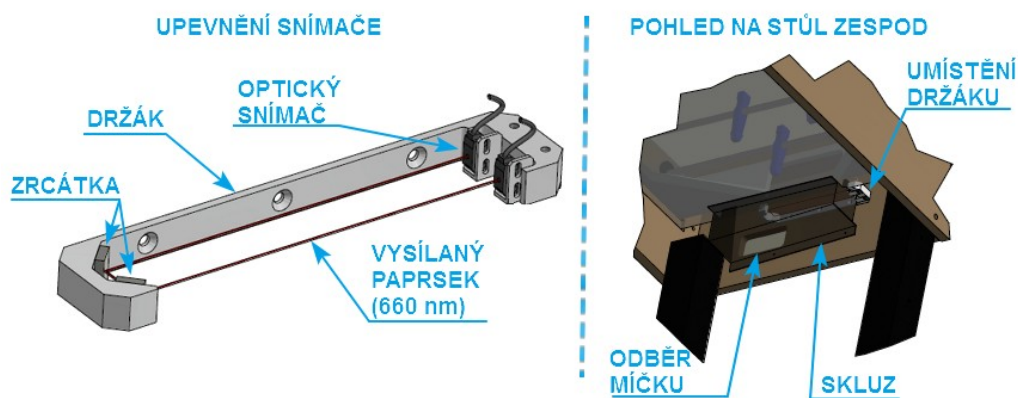
## 7.6 Návrh detekce vstřelení branky

Existují dvě varianty, jak zajistit detekci vstřelení branky. Prvním způsobem je softwarová implementace v řídicím programu. Nemusí se zasahovat do konstrukce fotbalíku a tím se ušetří náklady na potenciální úpravy stolu. Pokud kamera ztratí pozici míčku, jehož poslední oblast výskytu byla v okolí branky a po stanovený časový okamžik nedošlo k detekci míčku, řídicí algoritmus vyhodnotí tuto situaci jako vstřelení branky. Problém je však v umístění sběrného skluzu přímo



pod brankovištěm, který sbírá míčky propadající po vstřelení branky. Tento skluz by svou pozicí bránil ve snímání kamery, musel by se odstranit. Nebylo by tak možné odebírat míček z místa pro to určeného. Dalším problémem je rozhodnutí, jestli opravdu míček propadl. Existuje varianta pohybu míčku taková, kdy se míček pohybuje těsně kolem branky a na malý časový okamžik najede na mantinel a kamera s ním ztratí kontakt. Pokud by byl časový okamžik dostatečně dlouhý, algoritmus by vyhodnotil vstřelení gólu.

Druhá varianta detekce vstřelení branky odstraňuje možné nedostatky softwarového řešení. Do propadové části se umístí držák s fotoelektrickým senzorem typu vysílač-přijímač. Propadová část se nachází pod brankou v místě, kde je sběrný skluz. Profil propadu odpovídá obdélníku s přibližnými rozměry 210 mm na 75 mm. Zmíněný držák se připevní ke stěně stolu pomocí šroubů do dřeva a bude obsahovat zmíněný senzor. Míček se svým průměrem 34 mm by mohl být nedetekován, protože šířka profilu propadové části je více jak dvakrát větší, než je průměr míčku. Pro předejití této situace bylo navrženo experimentální lomení vysílaného paprsku tak, aby pokryl potřebnou plochu (Obr. 25). Lom paprsku je uskutečněn pomocí obyčejných zrcátek. Může dojít k situaci, kdy odrazky rozptýlí vysílaný paprsek natolik, že ho nebude moct detekovat přijímač senzoru. V tomto případě by se přemístil přijímač přímo naproti vysílači a zbytek propadové plochy v držáku by se zadělal kouskem plechu tak, aby míček s jistotou prošel skrz vysílaný paprsek.



Obr. 25 Řešení detekce míčku.

Ze široké nabídky na trhu byl podle typu aplikace vybrán fotoelektrický snímač, pracující na principu protnutí vysílaného paprsku mezi vysílačem a přijímačem. Typ vysílaného paprsku je červené světlo o vlnové délce 660 nm. V původní úvaze bylo použití infračerveného světla. Avšak při odrazu světla od zrcátek by došlo ke ztrátě intenzity světla. Aby se předešlo ztrátě intenzity, musely by se pořídit navíc speciální odrazky z materiálu jako stříbro nebo zlato.

Pro tento účel byl vybrán fotoelektrický snímač OESV 19 200 P3K od společnosti Di-Soric. Oproti podobným snímačům od různých výrobců disponuje miniaturními rozměry 19x10x8, které jsou ideální pro zástavbové rozměry. Snímač bude napájen napětím 24 V. Výstup snímače je digitální, typu PNP (50 mA) a následně bude připojen na svorkovnici digitálních vstupů sběrníkového systému X20. Provozní vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem je až 2 m a citlivost snímače lze nastavit pomocí rezistoru. [15]

## 7.7 Specifikace a umístění bezpečnostních komponent

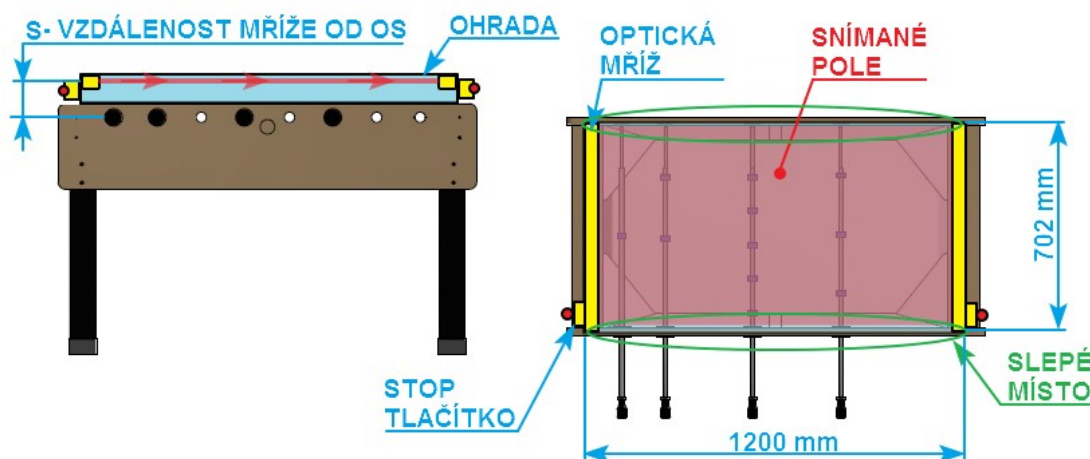
Pro posouzení rizik a stanovení celkové bezpečnosti stroje existuje hned několik norem. Tyto předpisy se používají už při návrhu zařízení a průběžně tak mají vliv na celkovou konstrukci a podobu stroje. Podle těchto dokumentů je možné stanovit různé stupně rizik. Postupnou úvahou vedenou normou lze detekovat například nebezpečné hrany, otvory. Nebezpečí, které nelze konstrukčně eliminovat, se musí zabezpečit například elektronicky. Na zbývající rizika je nutné upozornit různými varovnými štítky a popisem v dokumentaci stroje.

Při samotné hře na stolním fotbálku dochází občas k situaci, kdy se míček pohybuje natolik pomalu, že dojde k jeho úplnému zastavení. K tomuto zastavení může dojít v místech mimo rozsah

hráčů jednotlivých os. Míček se podle pravidel musí posunout k nejbližšímu obránci, na jehož polovině se míček nachází. Dojde-li k této situaci na půlící čáře, míček přísluší útočníkovi, se kterým měl míček poslední kontakt. Posouvání míčku provádí vždy lidský hráč rukou a právě pro tuto situaci se musela zajistit bezpečnost. Mohla by nastat situace, kdy osoba posouvá míček a řídicí systém by mohl detekovat pohyb míčku. Tím by mohlo dojít k rotaci, posunu některých os s hráči a k následnému možnému poranění lidské osoby (přesněji její ruky). Navržená bezpečnost slouží i pro nahodilé, nechtěné pohyby rukou a jiných částí lidského těla, které se dostanou do uvažovaného nebezpečného prostoru.

Nebezpečný prostor, hrací pole se všemi osami, lze zabezpečit dvěma způsoby. První variantou je plné zakrytí toho prostoru krytím z transparentního plexiskla. Krytí by se skládalo z ohrady a na ní ze shora položenou deskou. Pomocí pantů by se deska otevírala ze strany lidského týmu pro případné postrčení míčku. Detekce, jestli je prostor uzavřen, by se zajistila například elektromechanickými polohovými spínači. Toto řešení by však bylo nepohodlné v obsluze stolního fotbalku, protože vrchní deska by vážila přibližně 8 kg, což by po několikanásobné potřebě posunutí míčku bylo fyzicky náročné. Navíc by se hmotností této ochrany značně navýšila hmotnost fotbalku, což by ztížilo manipulaci se stolem.

Druhý způsob je úprava předešlé idey. Z původně myšlené sestavy plexiskla se odstraní vrchní deska. Na místo ní se do ohrady aplikuje bezpečnostní optická mříž. Tím se sníží celková hmotnost oproti původnímu návrhu a také se zlepší hráčské prostředí z hlediska pohledu do hracího pole. Deska z plexiskla byla uvažována sice jako transparentní, i tak by však docházelo k jistému zkreslování pohledu na hrací plochu. Celkově se tak s optickou mříží dostane mnohem lepší pohled na hrací plochu a také snadnější přístup pro posouvání míčku.



Obr. 26 Schéma umístění bezpečnostních komponent.

Optická clona bude umístěna do vrchní části ohrady tak, aby její poloha vysílaného signálu byla přibližně s hranou ohrady. Zabrání se tak situaci, kdy by mohl objekt (ruka) vniknout bez protnutí signálu optické závory. Dalším „slepým“ místem závory může být prostor po krajích ohrady (zeleně zaznačeno v obr. 26), které je zapříčiněno konstrukčním uspořádáním vysílače, přijímače. Při výběru clony se tedy bralo v potaz i toto hledisko. V případě, že by neexistoval takový druh optické clony, musela by se slepá místa zakrýt například pásy z plexiskla či jiného materiálu.

Pokud nastane potřeba odstavit zařízení z jiných důvodů, než pro přemístění míčku, budou po obou stranách fotbalku a pod displejem umístěna bezpečnostní tlačítka E-STOP (Emergency Stop).

### 7.7.1 Bezpečnostní optická mříž

Při výběru konkrétního typu bezpečnostní optické mříže se bralo v potaz několik hledisek. Prvním specifíkem je detekce objektu o minimální velikosti ruky, kterou člověk bude posouvat míček v hracím poli. Druhým kritériem je zmíněné konstrukční uspořádání vysílače a přijímače takové, aby

nevznikla slepá místa v snímaném prostoru. Třetí podmínkou jsou rozměry clony. U této aplikace je rozměr omezen na šířku ohrady nad hracím polem, která je o velikosti 742 mm. Optická mříž se tedy musí svou delší stranou vlézt dovnitř ohrady (viz. Obr. 26). Posledním požadavkem je vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem (1200 mm).

S těmito specifiky aplikace se v základu vybrala bezpečnostní optická mříž z řady SLIM od společnosti DATALOGIC. Výrobce v této třídě klade důraz na minimalizaci rozměrů a odstraňuje slepá místa na krajích přijímací a vysílací strany závory. Šířky snímaného prostoru jsou odstupňované po 60 mm počínaje od 150 mm až do 1200 mm. Pro náš případ byl zvolen rozměr 720 mm, který je zároveň i šířkou snímaného pole. Vůči šířce prostoru pro zabezpečení 742 mm zbude po rozdílu šířky závory a snímaného pole velikost slepého místa 11 mm na každé straně plochy. Velikost tohoto slepého místa odpovídá zhruba prstu lidské ruky. Nenastane tak riziko vniknutí objektu, například o rozměrech lidské ruky, do snímaného prostoru.

Pro bližší určení optické mříže bylo zapotřebí posoudit rizika a v závislosti na nich určit výkonnostní úroveň bezpečnostního zařízení. Úroveň určuje schopnost tohoto zařízení vykonávat určitou bezpečnostní funkci a dělí se do pěti skupin „a“ (nejnižší) až „e“ (nejvyšší). Proces určení si lze představit jako stromový graf, kde se postupně posuzuje vážnost poranění (dočasné, trvalé následky), frekvence a doba vystavení nebezpečí, poslední je možnost vyhnutí, omezení újmy na zdraví. V tomto případě se určila úroveň výkonnostního zařízení jako „b“, což odpovídá nižším výkonnostním nárokům na bezpečnostní zařízení. Dále se aktivní optické bezpečnostní prvky dělí do dvou typů (typ 2 nebo 4) a to podle jejich optického výkonu vysílaného signálu. Zmíněný výkon se dělí dle maximální hranice efektivního vyzařovacího úhlu, který je pro typ 2 v odchylce  $\pm 5^\circ$  a pro typ 4 v odchylce  $\pm 2,5^\circ$ . Jinak řečeno typ 4 má víc zaostřený paprsek a je tedy vhodný pro rizikovější situace, což odpovídá ve výkonnostní úrovni třídám „d“ a „e“.

Dle specifikace úrovně, typu zařízení byl z řady SLIM vybrán model SL2-24-0720. V označení se skrývají specifikovaná data, kde první řetězec „SL2“ charakterizuje řadu SLIM a typ 2. V pořadí druhý řetězec charakterizuje rozlišení mříže 24 mm. Objekt, který je závora schopna detekovat, musí mít rozměr větší jak 24 mm. Poslední číslo v názvu určuje šířku snímaného pole, v tomto případě 720 mm.

SL2-24-0720		
Typ	[-]	2
Výkonnostní úroveň	[-]	c
Rozlišení	[mm]	24
Snímaná šířka	[mm]	720
Provozní vzdálenost	[m]	0 - 20
Napájecí napětí (stejnoseměrné)	[V]	24
Výstup	[-]	2x PNP
Proud na výstupu (max/výstup)	[A]	0,3
Nominální doba odezvy	[ms]	7 - 13

Tab. 9 Technická data bezpečnostní optické mříže. [16]

V tabulce č. 9 lze vidět rozdílnost ve výkonnostní úrovni zařízení (hodnota c), než jaká byla určena (hodnota b), což vyplývá z norem IEC 61496-1 a 61496-2, které stanovují následující podmínky. Aktivní optický bezpečnostní prvek typu 2 lze použít maximálně pro výkonnostní třídu „c“ a prvek typu 4 lze použít maximálně pro úroveň „e“. Výrobce proto vyrábí konkrétně tyto optické mříže ve dvou typech (typ 2 a 4), které pokryjí všechny výkonnostní třídy. Bezpečnostní mříž se bude napájet 24 V stejnosměrného napětí a společně s nouzovým tlačítkem E-STOP se přivede na digitální bezpečnostní vstupy sběrnice modulu X20.

Poslední nezbytnou částí je umístění optické mříže. Výpočet minimální vzdálenosti od nebezpečného prostoru popisuje evropská norma EN999 pro různé polohy umístění závory (horizontální, vertikální, šikmé).

Pro případ umístění optické závory nad hracím polem a průniku objektu (ruky) kolmo k detekční zóně se použije vztah 7.1.

$$S = (K \cdot T) + C \text{ [mm]} \quad (7.1)$$

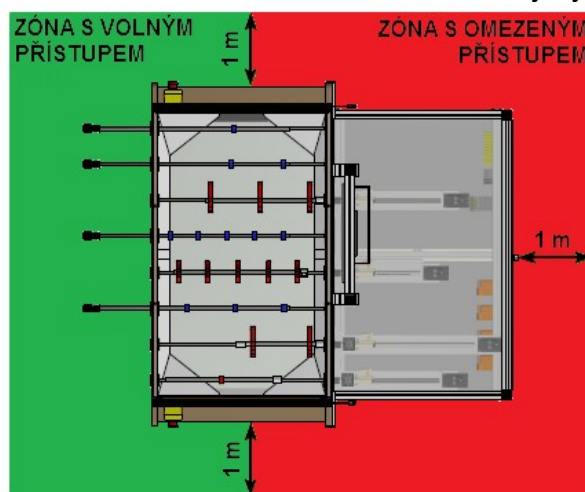
Kde symbol  $S$  [mm] je bezpečná vzdálenost (obr. 26).  $K$  [ $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ] je rychlost pohybu těla (části těla) a je stanovena normou dle experimentálního měření v rozmezí 1600 až 2000  $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ . Pro stanovování bezpečné vzdálenosti při detekci lidského těla se doporučuje použít hodnotu 1600  $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ . U detekce menších objektů, jako jsou například prsty, je doporučenou používat vyšší hodnotu rychlosti pohybu 2000  $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ . Celkový čas  $T$  [s] je dán součtem reakčních časů, a to reakce bezpečnostního členu s dobou zastavení stroje. Tato veličina byla určena z dostupných dat optické závory a z konkrétního měření na robotickém fotbalu, kdy bylo provedeno zastavení pohonů z jejich maximálních rychlostí. Ve výsledku byl stanoven čas  $T = 0,02$  s. Konstanta  $C$  [mm] je doplňující distance zohledňující charakteristiku závory,

$$C = 8 \cdot (d - 14) \text{ [mm]} \quad (7.2)$$

kde symbol  $d = 24$  mm představuje rozlišení použité optické clony. Po dosazení této hodnoty je velikost doplňující distance rovna  $C = 80$  mm. Výsledná hodnota ze vztahu (7.2) se dosadila spolu s ostatními konstantami do rovnice (7.1) a stanovila se minimální bezpečná vzdálenost  $S = 120$  mm. Bezpečnostní optická mříž smí být tedy umístěn nejbližší 120 mm od pohyblivých herních os.

### 7.7.2 Vytyčení bezpečných zón

Jedním z možných výskytů robotického fotbalu jsou i veřejná místa, jako jsou například výstavy. Při provozu se může vyskytovat v blízkosti velké množství lidí a poučená osoba dohlížející na provoz zařízení může ztratit přehled o situaci. V takovém případě by mohlo dojít k nechtěnému nebo i k úmyslnému poškození vozíku nebo fotbalu. Z těchto důvodů byly navrženy zóny, určující v jaké vzdálenosti od robotického fotbalu se mohou náhodní uživatelé vyskytovat.



Obr. 27 Rozvržení přístupových zón.

Zeleně značená oblast určuje volný přístup lidským hráčům a přihlížejícím osobám. Zóna je opatřena bezpečnostními prvky a také bude pod dohledem patřičně poučené osoby. Červeně označená plocha je místo, kde osoby nebudou mít bezprostřední přístup k zařízení. Ohraničení plochy bude provedeno páskou, či jinými prostředky (Obr. 27).



## 8 NÁVRH A POPIS ŘÍDÍCIHO SYSTÉMU

Následující návrh systému je zhotoven pro řízení jedné osy robotického fotbalu. V budoucnu při řízení zbývajících os se schéma na obr. 28 bude lišit pouze počtem frekvenčních měničů ACOPOSmicro (celkově 4 kusy), podle měření proudů při zkušebním provozu i počtem zdrojů napájení pro pohony a také celkově osmi kusy pohonných jednotek (4 servomotory, 4 lineární motory). Prvky ve schématu jsou propojeny barevnými linkami podle typu zapojení.

Základní linii (modrá linka) řídicího systému tvoří systémová výpočetní jednotka s displejem, digitální frekvenční měniče, sběrníkový systém X20 a průmyslová kamera. Za komunikační protokol byl zvolen POWERLINK (dále jen PL), který je postaven na technologii Fast ETHERNET dle normy IEEE 802.3. Důvodem volby tohoto protokolu byla potřeba zajistit dosti rychlou komunikaci průmyslové kamery s řídicí jednotkou pro získání a zpracování dat, ale také požadavek rychlého řízení pohonů. PL tyto požadavky splňuje, protože je schopen přenášet data v reálném čase (nejkratší doba cyklu 200  $\mu$ s) a také využívá přímou komunikaci (peer-to-peer) všech uzlů dohromady (odeslaná data může přijmout kterýkoliv uzel v síti).

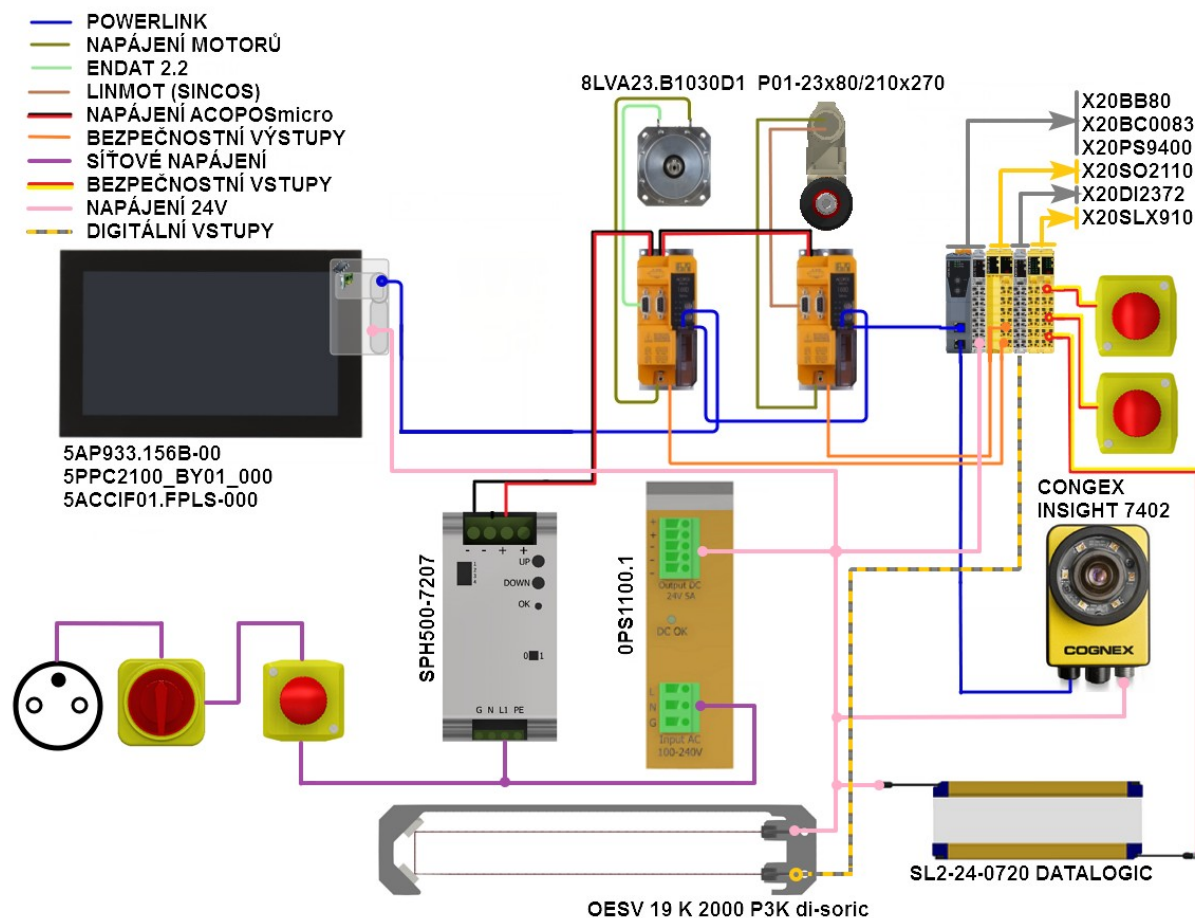
Motory jsou připojeny vždy podle typu komunikačního rozhraní k příslušnému frekvenčnímu měniči. Ze synchronního rotačního motoru vedou fyzicky dva kabely, jeden je napájecí (olivová linka), druhý je pro přenos dat s rozhraním EnDat 2.2. Z lineárního motoru vede pouze jeden kabel obsahující jak komunikační rozhraní LinMot®, tak napájecí vedení.

Předposledním prvkem v hlavní linii je sběrníkový systém X20. Celkový modul se skládá ze čtyř částí. Na prvním místě je řadič sběrnice (X20BC0083), který má za úkol propojit zbývající části modulu (vstupy, výstupy) s komunikační sítí PL. Spolu s napájecím modulem X20PS9400 mají společnou sběrníkovou základnu X20BB80. Pro provozuschopnost řadiče sběrnice se přivede na napájecí modul stejnosměrné napětí 24 V (růžová linka). Druhým prvkem je X20SO2110, který obsahuje dva bezpečnostní výstupy. Výstupní signál má velikost napětí 24 V a proud o hodnotě 0,5 A. Tyto výstupy jsou připojeny na napájení logiky řídicích jednotek motorů (oranžová čára). V případě nutnosti zastavení pohybů pohonů se tak přeruší signál bezpečnostního výstupu a tím se okamžitě vypne řízení motorů. Motory však nadále zůstanou pod napětím. Předposledním členem sběrníkového modulu je prvek s digitálními vstupy X20DI2372, který obsahuje dva digitální vstupy. Výhodou je uspořádání jeho vstupů, které nabízí tří vodičové zapojení (šedožlutá linka) vhodné pro zvolený snímač typu PNP. Poslední částí je bezpečnostní inteligentní jednotka X20SLX910 s bezpečnostními digitálními vstupy, na které se připojí (žlutočervená čára) dvě stop tlačítka a bezpečnostní závora SL2-24-0720.

Hlavní linii uzavírá průmyslová kamera, která snímá pozici míčku. Aparát obsahuje tři konektory. První z nich slouží pro komunikaci pomocí Ethernetu nebo PL. Na druhý konektor se přivede stejnosměrné napětí 24 V a poslední je pro napájení osvětlení integrované v kameře. Pro tuto aplikaci však nebude využito, protože se použije externí osvětlení.

Pro napájení a řízení motorů se zvolil zdroj napětí pro připojení na jednu fázi o střídavém napětí 230 V a kmitočtu 50 Hz (zásuvka). Důvodem je předpoklad lepší možnosti připojení do sítě pomocí klasické zásuvky, nežli připojení na tři fáze.

Pro napájení displeje, optických senzorů, osvětlení a dalších prvků (růžová linka) se při návrhu zdroje musely vzít potaz jednotlivé příkony. Jejich součtem je dán celkový příkon soustavy a ten stanovuje minimální velikost výkonu, který daný zdroj musí splňovat. Finální zdroj byl vybrán navíc s jistou rezervou výkonu tak, aby byly pokryty případné výkonnostní výkyvy. Tento zdroj se jako výše zmíněný zdroj pro pohony také připojí pomocí zásuvky na jednu fázi. Výstupním napětím je stejnosměrné napětí 24 V s proudem až 10 A (výkon 240 W).



Obr. 28 Celkové schéma zapojení systému.

V následující tabulce č. 10 jsou uvedeny vybrané parametry modulů navrhovaného systému X20. Pro stručnost jsou uvedeny pouze zkratky, kde  $P_C$  [W] (Power Consumption) je příkon,  $U_{IN}$  [V] symbolizuje vstupní stejnosměrné (DC- direct current) napětí,  $v_T$  [Mb/s] udává přenosovou rychlost,  $T_{CYCLE}$  [ $\mu$ s] je perioda cyklu,  $P_{CSEN}$  [W] představuje příkon připojených senzorů.  $V_{PULSE}$  [V] a  $I_{PULSE}$  [mA] charakterizují napětí a proud výstupního pulsu pro testování stavu připojených bezpečnostních prvků (např. E-STOP tlačítka).

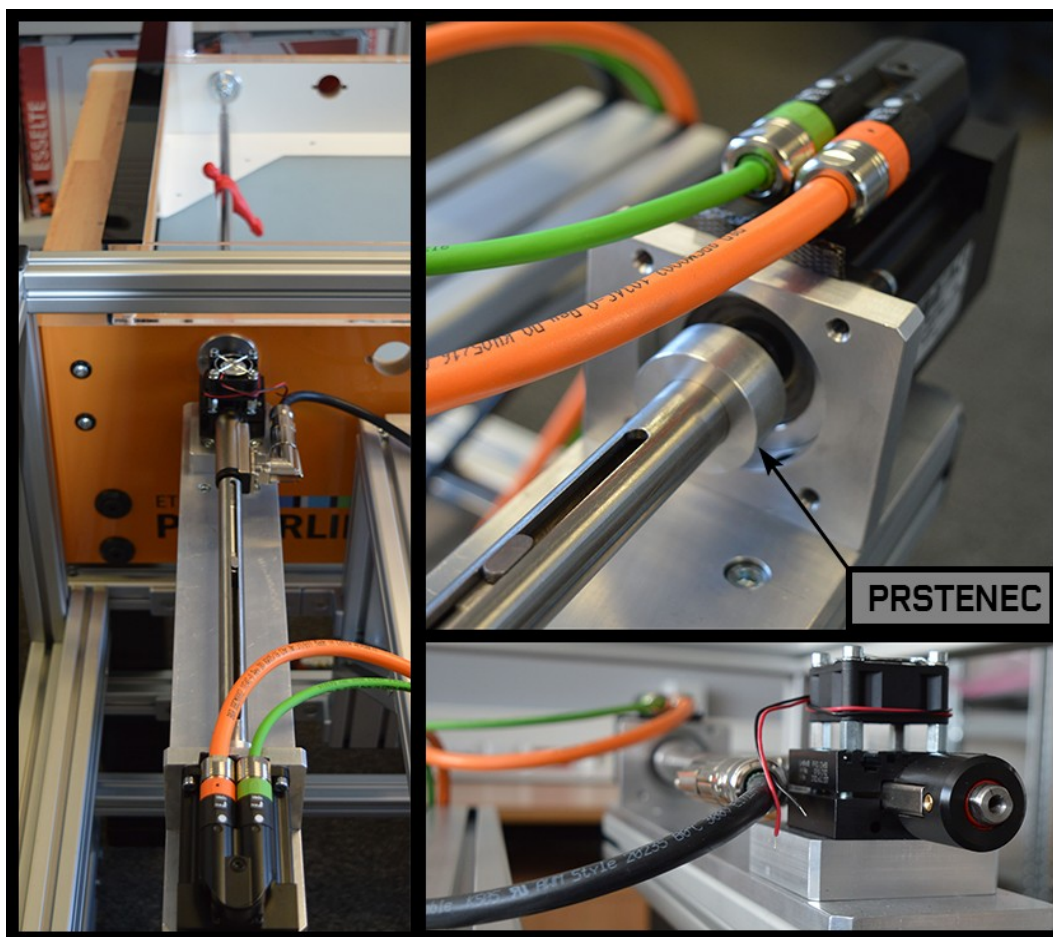
Označení	Popis komponenty	Parametry
X20BB80	Sběrnice základna	$P_C = 0,35$ W, $U_{IN} = 24$ V <sub>DC</sub> , $I_{NMAX} = 10$ A
X20BC0083	Řadič sběrnice pro POWERLINK	$P_C = 2$ W, $v_T = 100$ Mb/s, $T_{CYCLE} = 200\mu$ s, 2xRJ45
X20PS9400	Napájecí modul pro řadič sběrnice	$P_C = 2$ W, $U_{IN} = 24$ V <sub>DC</sub> , $I_{IN} = 0,7$ A
X20SO2110	Modul dig. bezpečnostních výstupů	$P_C = 1,3$ W, $U_{IN} = 24$ V <sub>DC</sub> , $I_{IN} = 1$ A
X20DI2372	Modul digitálních vstupů	$P_C = 0,4$ W, $U_{IN} = 24$ V <sub>DC</sub> , $P_{CSEN} = 12$ W
X20SLX910	Modul dig. bezpečnostních vstupů	$P_C = 2$ W, 20x dig. vstup, 4x pulsní výstup, $U_{IN} = 24$ V <sub>DC</sub> , $I_{IN} = 2,48$ mA, $V_{PULSE} = 24$ V <sub>DC</sub> , $I_{PULSE} = 50$ mA, SafeLOGIC funkce

Tab. 10 Vybrané parametry modulů systému X20. [7]



## 9 REALIZACE KONSTRUKCE

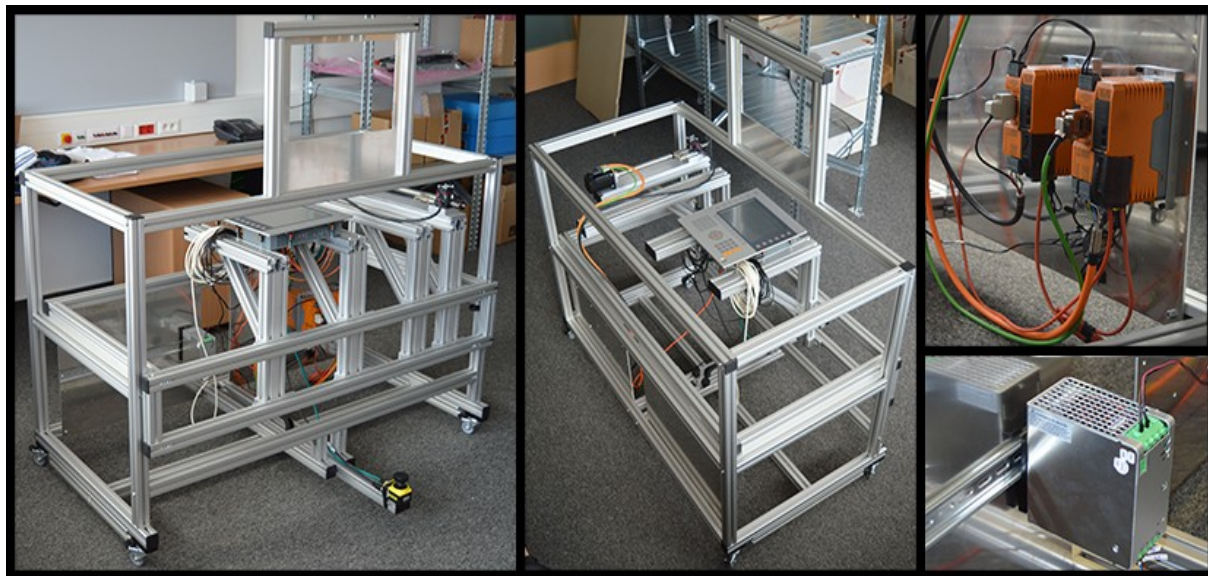
Na následujícím obrázku lze pozorovat kompletní zhotovení pro osu s brankářem. Vyrobená byla jedna osa robotického fotbalu, na které se ověřila funkčnost navrženého mechanismu. Při testování se dohlíželo na správnost chodu, což se týkalo zejména mechanické části zajišťující přenos pohybu. Sledování se zaměřilo na tření a vůle v kluzných uloženíh a na správnost uložení motorů (umístění pohonů v ose). Po odstranění možných nepřesností bude tato robotická osa ohodnocena jako vyhovující a úprava původního stolního fotbalu bude pokračovat na zbývajících osy (řada obránců, záložníků, útočníků). Při dalších úpravách os se uplatní univerzálnost provedení, tzn. konstrukce uložení pohonů u zbývajících os bude kopií první upravené osy. Osy se budou lišit pouze v délkách posuvů (budou se měnit pouze vzdálenosti mezi lineárním motorem a servomotorem). Rozsahy posuvů jednotlivých řad (os) se totiž liší dle počtu plastových hráčů na jednotlivých osách. Fyzické provedení mechanismu převádějící rotační a posuvný pohyb se liší v malých detailech. Důvodem změn byla jednodušší výroba dílů, v tomto případě duté hřídele. Uvažované přichycení duté hřídele ve vnitřním průměru pomocí šroubu bylo nahrazeno prstencem (Obr. 29), který svírá dutou hřídel na vnějším průměru. Sevření zajistí dostatečnou sílu nato, aby dutá hřídel s drážkou pro pero zůstala během pohybu nasunutá na hřídeli servomotoru.



Obr. 29 Realizace jedné osy fotbalu.

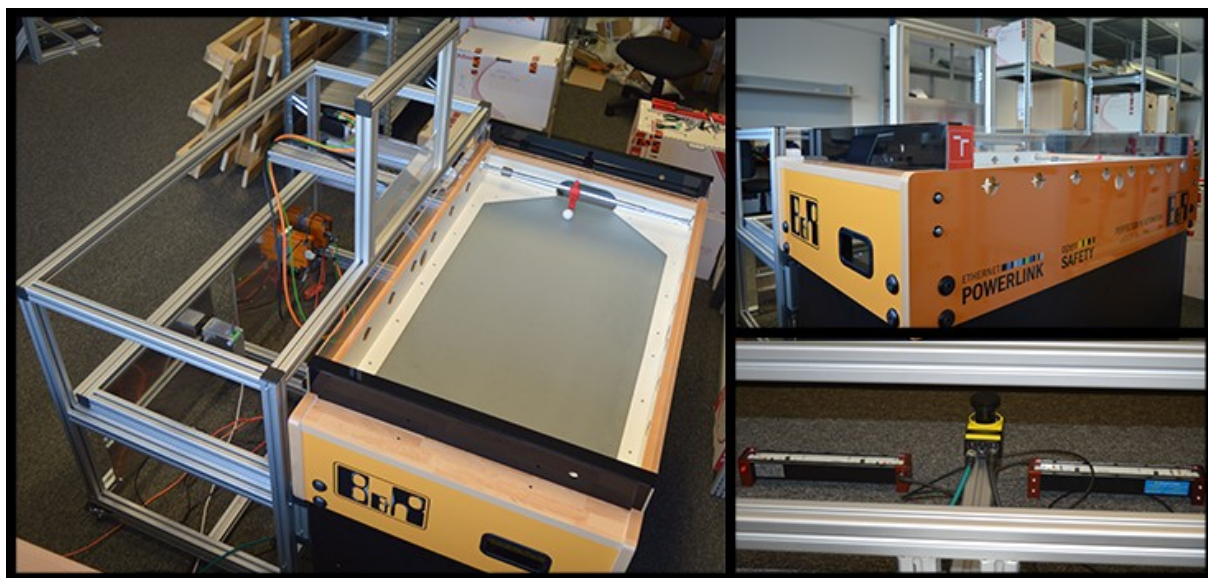
Pojízdný kabinet sloužící pro uložení řídicího systému se podařilo zhotovit do „hrubého“ provedení tak, aby mohlo být uskutečněno laboratorní testování robotického fotbalu. Jak je patrné na obr. 30, byla zhotovena podstatná část konstrukce pojízdného kabinetu. Vozík obsahuje navržený rám s připravenými „šibenici“ pro umístění uložení pohonů. Dále jsou v něm na hliníkových

plátech umístěny frekvenční měniče a DIN lišta se zdrojem pro napájení motorů. Na výsuvném rameni je umístěna kamera od firmy COGNEX s objektivem. Pro umístění dotykového displeje s integrovanou systémovou jednotkou je připraven v horní části kabinetu otvor v hliníkovém plátu, který bude ve finální podobě přebarven na oranžovou barvu dle navrženého modelu.



*Obr. 30 Reálné vyhotovení pojízdného kabinetu.*

Vozík splňuje podmínku mobility, snadné montáže i demontáže ke stolu fotbalku. Pro odpojení, zapojení zařízení se stolem je potřeba pouze základního nářadí a jedné osoby. Vozík se přirazí ke stolu. Pomocí šroubů, vedoucího skrze nohy stolu, se upevní rám s motory ke stolnímu fotbalku. Poté se zabrzdí vozík a vysune se rameno s kamerou pod stůl. Hřídel lineárního motoru s trnem se protáhne skrze kluzné uložení ve stěně fotbalku. Konec této hřídele (slideru) se spojí pomocí spojky s osou stolního fotbalku (osa s brankářem). Mechanická část je tímto postupem nachystána na spuštění systému (Obr. 31). Připojením do sítě (zásuvky) dojde k načtení systému v řídicí jednotce a robotický fotbalák je připraven na spuštění řídicího programu.



*Obr. 31 Celková sestava robotického stolního fotbalku.*



## 10 PARAMETRIZACE A ŘÍZENÍ POHONŮ

Kapitola obsahuje postup od připojení motorů až po testování základních pohybů pohonů. V jednotlivých odstavcích je popsáno nastavení parametrů určujících charakteristiku lineárního a rotačního pohybu. Oddíl dále seznamuje s převodem parametrů lineárního motoru na charakteristiky servo motoru. Závěr kapitoly je věnován nastavení regulátoru polohy s následným testováním lineárního a rotačního pohybu robotické osy.

### 10.1 Připojení pohonů

Jak je patrné z obr. 29, synchronní servomotor společnosti B&R je připojen pomocí dvou kabelů a lineární motor LinMot® od společnosti NTI AG je zapojen pouze jedním kabelem. Počet kabelů je dán výrobcem motoru.

U servomotoru oranžový kabel slouží jako napájecí a je připojen na výstupní svorky frekvenčního měniče, zeleně značený kabel slouží pro komunikaci s absolutním enkodérem motoru (přenos dat, napájení, časování). Pro komunikaci mezi enkodérem a frekvenčním měničem je využíváno rozhraní EnDat 2.2. Kabel lineárního motoru má zabudovaný komunikační a napájecí kabel v jednom vedení. Do motoru LinMot® je přiveden pouze jeden kabel, na straně k frekvenčnímu měniči je kabel rozvětven na komunikační a silovou část. Inkrementální enkodér lineární jednotky používá rozhraní pro komunikaci s označením LinMot®, což podle „pinout“ konfigurace odpovídá resolveru. [7]

### 10.2 Nastavení parametrů motorů

Po zapojení pohonů byly nadále prováděny pouze softwarové změny. Prvním krokem bylo vytvoření projektu v AS (Automation Studio), který se postupně modifikoval do podoby schopné provést například základní pohyby jednotlivých pohonů.

#### 10.2.1 Založení projektu

Do projektu, v okně „physical view“ (sekce pro vkládání hardwarové konfigurace), byly vloženy jednotlivé komponenty (displej s integrovanou systémovou jednotkou, digitální frekvenční měniče, X20 sběrnice, systém, atd.) v pořadí, v jakém jsou fyzicky zapojeny. Při vkládání frekvenčních měničů ACOPOSmicro přes POWERLINK (modrá linka na obr. 28) je automaticky spuštěn průvodce jeho konfigurací. V prvním kroku konfigurace byly zvoleny použité servomotory. Jelikož knihovny AS nepodporují lineární motory, byla tato volba přeskočena a motor jako takový byl definován dodatečně v příslušné tabulce pro parametry motoru. V druhém kroku byl nastaven jazyk pro chybové hlášky (např. Angličtina). Dále se zapsalo jméno názvu reálné osy a byly zvoleny možnosti nastavení koncových spínačů. Název pro reálnou osu je specifický pro celý projekt a používá se jako reference na reálnou osu (motor) při programování. Koncové snímače jsou nastavovány jako standardně otevřené, protože nejsou fyzicky přítomny na ose. V posledním kroku průvodce informuje o nastavených parametrech frekvenčního měniče. Po dokončení průvodce AS vytvořilo objekty nesoucí názvy os zadané v průvodci.

NC Object Name	Nc Object Type	Channel	Simulation	NC INIT Parameter	ACOPOS Parameter
gAxis01	ncAXIS	1	Off	gAxis01i	gAxis01a
80VD100PD.C000-01_ncAXIS2	ncAXIS	2	Off		
80VD100PD.C000-01_ncV_AXIS1	ncV_AXIS	1			
80VD100PD.C000-01_ncV_AXIS2	ncV_AXIS	2			

Obr. 31 Vytvořený objekt osy. [17]

Na obr. 31 je znázorněn vytvořený objekt osy, který slouží jako reference pro programování. Typ NC objektu „ncAxis“ udává informaci o druhu práce s reálnou osou („ncV\_AXIS“ je práce



### 10.2.3 Parametry lineárního motoru

Řízení lineárního motoru LinMot® za pomoci softwaru a hardwaru společnosti B&R sebou přineslo dva problémy. První nesází byla rozdílnost v původu (výrobci) lineárního motoru a řídicího softwaru. Druhým problémem bylo řízení přímočarého pohybu, kde AS je uzpůsobeno pouze pro řízení rotačních pohybů (motorů).

Problém rozdílnosti výrobců lineárního motoru a řídicího systému je vyřešen kooperací obou firem. Společnost B&R nabízí hardwarové řešení v podobě speciálního frekvenčního měniče a zmíněného připojovacího kabelu, vytvořeného přímo pro řízení motorů LinMot®.

I softwarová část v AS počítá s připojením těchto lineárních jednotek. Stejně jako u servomotoru byl vytvořen objekt, např. „gAxis02“, skládající se ze dvou částí (inicializační a parametrická). Jelikož lineární motor nespádá do skupiny výrobků B&R, AS není přímo uzpůsobeno pro řízení lineární jednotky. Proto bylo nutné nejprve převést parametry lineárního motoru, které byly zapsány v datovém listu pohonu, na parametry rotačního motoru (Obr. 33). Tyto převedené charakteristické veličiny byly vloženy do parametrické tabulky objektu osy, např. Pod názvem „gAxis02a“. Dále byla nastavena hodnota typu enkodéru na „ncLINMOT“ v tabulce parametrů frekvenčního měniče. Zmíněná hodnota specifikuje použitý enkodér motoru.

Name	Value	Unit		Name	Value	Unit
MOTOR_POLEPAIR_WIDTH	0.02	m		$\tau_M$ Motor reference length	0.02	m
MOTOR_LINEAR_SPEED_NOMINAL	6	m/s		MOTOR_POLEPAIRS	1	-
MOTOR_LINEAR_SPEED_MAX	6	m/s		MOTOR_SPEED_RATED	18000	min <sup>-1</sup>
MOTOR_FORCE_STALL	9	N		MOTOR_SPEED_MAX	18000	min <sup>-1</sup>
MOTOR_FORCE_RATED	9	N	→	MOTOR_TORQ_STALL	0.03	Nm
MOTOR_FORCE_MAX	44	N		MOTOR_TORQ_RATED	0.03	Nm
MOTOR_LINEAR_VOLTAGE_CONSTANT		V <sub>rms</sub> /(m/s)		MOTOR_TORQ_MAX	0.14	Nm
MOTOR_FORCE_CONST	11	N/A <sub>rms</sub>		MOTOR_VOLTAGE_CONST	0.00	mV/min
MOTOR_MASS	0.271	kg		MOTOR_TORQ_CONST	0.035	Nm/A <sub>rms</sub>
ENCODER: Type	SinCos/INC			MOTOR_INERTIA	0.0000027	kgm <sup>2</sup>
ENCODER: Line (Signal period) length	1000	um / line		SCALE_ENCOD_INCR	327680	Inc/ $\tau_M$
MOTOR_BRAKE_FORCE_RATED		N		MOTOR_BRAKE_TORQ_RATED	0.00	Nm
Input fields: Enter values						
Output fields						

Obr. 33 Ukázka převodu parametrů lineárního motoru. [17]

Do inicializační tabulky, podobně jako u servomotoru, byly navoleny hodnoty specifikující pohyb. Jako hlavní jednotka byla zvolena 1 mm s přesností na desetinu milimetru. Od této jednotky byly odvozeny maximální hodnoty pro rychlost, zrychlení a zpomalení v obou směrech.

S takto parametrizovanými objekty os bylo možné pokračovat k automatické softwarové diagnostice pohonů. Pro diagnostiku bylo použito testovací prostředí (okno). V kontextu AS je nazýváno pojmem „NC TEST“ sloužící pro ladění regulátorů, fázování, základní pohyb os, atd. Testovací okno je možné otevřít ve dvou módech. Prvním je paralelní mód, který umožňuje paralelně vykonávat příkazy z již spuštěného programu s příkazy z testovacího okna. Tato volba je výhodná při zapnutém stroji, který vykonává program. Obsluha stroje může provádět příkazy z testovacího prostředí, aniž by přerušila samotný chod stroje. Nevýhodou mohou být konfliktní příkazy mezi programem stroje a operátorem (např. stroj roztočí osu a operátor zadá příkaz zastav osu). Druhou volbou je výhradní režim, který izoluje příkazy programu stroje a upřednostní pouze příkazy z testovacího okna. V případě této práce byl použit výhradní režim (Exclusive mode), protože nebylo přistupováno k testování na stroji za provozu.

### 10.2.4 Diagnostika pohonů.

V diagnostice pohonů byl proveden postup zahrnující jednotlivé kroky automatických procesů, které zajistili stanovení komunikačního offsetu enkodéru, dodatečnou identifikaci parametrů a nastavení parametrů regulátoru pozice a rychlosti. Dříve než bylo uskutečněno ladění parametrů

motoru, byly uloženy dosavadní změny v projektu (hardwarová konfigurace, parametry motorů) a data byly přenesena za pomoci přenosové karty (Compact Flash) do systémové jednotky. Řídící jednotka nahrála veškeré informace a od tohoto okamžiku bylo možné spojení mezi systémem skrze Ethernetovou komunikaci a AS na osobním počítači. Nebylo nutné znovu nahrávat data na přenosové médium. Přenos nových dat, úpravy parametrů motoru a frekvenčního měniče byly posílány přímo z osobního počítače.

- **Fázování enkodéru**

Při provozu synchronních motorů je nutné znát přesnou polohu rotoru vůči statoru. Jelikož motor neobsahuje kartáčky komutátoru, komutace je řízena elektronicky v závislosti na poloze hřídele. Pro fázování enkodéru bylo úkolem zjistit komunikační offset mezi daným enkodérem a cívkou statoru motoru. Výsledkem fázování byla přesná komutace, vyvozena z informace o přesné pozici hřídele rotoru.

Fázování nebylo nutné provádět pro motory společnosti B&R, protože komunikační offset je vždy uložen v paměti EnDatu. Stanovení offsetu proběhlo pouze pro lineární motor, kde slider byl považován za rotor motoru. Nejprve byly nastaveny parametry pro fázování. Prvním specifickým byl režim procesu, který byl zvolen dle kritérií (inkrementální enkodér, motor bez brzdy, testovací velikost pohybu) na hodnotu „Kmitavý režim“ (Dither mode). Mód byl pojmenován právě takto, protože slider osciluje během fázování, kdy je aplikován do statoru motoru pomalu se otáčející vektor proudu. Offset byl poté počítán z odpovídajícího pohybu hřídele na testovací signál. Doplňujícími parametry tohoto módu, jenž stanovují tvar oscilací, byl fázovací proud a perioda.

Po provedení prvního fázování vyhodnotí proces fázování enkodéru komunikační offset, kde pro případ lineárního motoru byla stanovena hodnota 1,57 rad. Pro ověření, zdali byl tento offset správný, bylo provedeno druhé a třetí fázování. Výsledkem byly téměř shodné hodnoty, což potvrzovalo kvalitu prvního fázování. Na závěr bylo provedeno uložení komunikačního offsetu do parametrické tabulky příslušného frekvenčního měniče.

- **Automatická identifikace parametrů**

K ručně dopsaným parametrům lineárního motoru bylo nutné provést ještě ověřující parametrizaci. Režimy doladování parametrů byly dva. První identifikoval parametry měřením motoru, druhý vypočítal parametry ze zadaných parametrů z datového listu motoru. Při spuštění parametrizace vzalo AS zadané parametry a v závislosti na zvoleném režimu určilo kvalitu této identifikace. Ve výsledku byla posouzena kvalita identifikace parametrů a byly dopsány neznámé parametry motoru. Například hodnota kvality 100 % indikovala přesnou shodu vypočítaného modelu s křivkami signálu, vytvořených na základě zadaných parametrů. Z nově vypočítaných parametrů, které nebyly dostupné z datového listu motoru, to byla například napěťová konstanta o velikost 5,209 mV•min.

- **Automatické nastavení regulátorů**

Po předchozích krocích byla možnost přistoupit k automatickému ladění regulátorů, které bylo provedeno pro rotační i lineární motor. Frekvenční měniče ACOPOS pro servomotory jsou založeny na kaskádovém konceptu regulátoru, který pracuje následujícím způsobem:

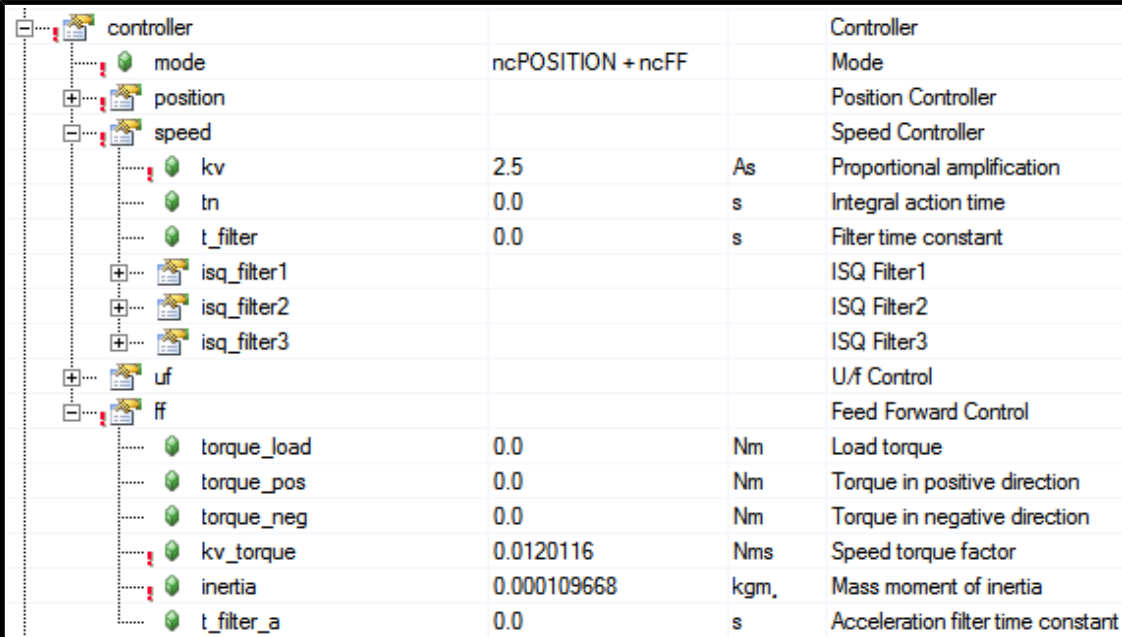
- 1) Příkaz k polohování na pozici způsobí nastavení hodnot generátoru k výpočtu profilu cesty. Na základě tohoto profilu je regulátoru pozice předkládána sada hodnot pozic.
- 2) Pro dosažení nastavené pozice regulátor polohy specifikuje rychlostní profil.
- 3) Snahou regulátoru rychlosti je držet se daného rychlostního profilu co nejlépe je možné.
- 4) V poslední řadě je nastavován proud pro proudový regulátor, řídicí bipolární tranzistory s izolovaným hradlem (Insulated Gate Bipolar Transistor) na výkonovém výstupu.

V prvním kroku bylo provedeno ladění regulátoru rychlosti. Jeho úkolem bylo určení rozdílu mezi akční veličinou regulátoru polohy (ke kterému je podřízen) a měřené rychlosti. Dále byla také vypočítána akční veličina pro podřadný regulátor proudu k odstranění odchylky polohy. Ladění probíhalo v testovacím okně příslušného frekvenčního měniče a reálné osy. V příkazovém stromě

v položce nastavení (Setup) byla zvolena možnost automatické ladění regulátorů (Controller Autotuning). Zde byl jako testovací režim nastaven na hodnotu „ncSPEED + ncT\_FILTER2“ a také procentuální nastavení maximálního proudu a rychlosti pohybu. Režim byl zvolen s filtrem toho typu podle doporučení v dokumentaci AS pro lineární motor. Pro servomotor byl použit režim bez filtru. Filtr byl dopočítáván automaticky a napomáhá ke stabilizaci řízeného systému. Zároveň však může snížit dynamiku systému. Velikosti proudu a rychlosti byly dle uvážení zvoleny okolo 50 %. Pro nastavení hodnot bylo spuštěno automatické ladění. Při správném průběhu ladění je slyšet třikrát hluk testovacího signálu z motoru.

Po dokončení ladění regulátoru rychlosti bylo nutné provést automatickou parametrizaci regulátoru polohy. Úkolem regulátoru je porovnání nastavovaných hodnot polohy, jdoucích z generátoru, s aktuálními hodnotami pozic. Na základě rozdílu těchto velikostí regulátor polohy generuje akční veličinu pro regulátor rychlosti, aby byla eliminována odchylka polohy. V testovacím okně, stejně jako v minulém kroku byl v nastavení regulátoru zvolen režim „ncPOSITION“. Byly nastaveny procentuální hodnoty maximálního proudu a rychlosti pohybu. Po spuštění ladění byl motor podstoupen testovacímu signálu, jehož hluk (šum) bylo slyšet jedenkrát. Po dokončení ladění byly stanoveny nové parametry regulátoru polohy a byly uloženy do inicializační tabulky (např. „gAxis01“) s parametry pohybu příslušné osy (lineárního a rotačního motoru).

Předposledním krokem nastavování parametrů regulátoru byl režim „Feed-Forward“. Úkolem tohoto módu je redukování zátěže na regulátoru při změnách rychlosti. Výstupní hodnoty vypočítané tímto režimem berou v potaz moment setrvačnosti systému. Výstupem ladění je stanovena řada hodnot, jakou je například moment setrvačnosti, pohybové parametry pro rychlost a zrychlení. Například moment setrvačnosti zátěže pro servomotor stanovený tímto režimem byl o velikosti  $1,1 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$  (Obr. 34). Tato hodnota nebyla příliš odlišná od ručně vypočítané hodnoty momentu setrvačnosti soustavy  $I_s = 1,6 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$  v odstavci 6.2, čímž byla potvrzena správnost výpočtu při návrhu servomotoru.



controller			Controller
mode	ncPOSITION + ncFF		Mode
position			Position Controller
speed			Speed Controller
kv	2.5	As	Proportional amplification
tn	0.0	s	Integral action time
t_filter	0.0	s	Filter time constant
isq_filter1			ISQ Filter1
isq_filter2			ISQ Filter2
isq_filter3			ISQ Filter3
uf			U/f Control
ff			Feed Forward Control
torque_load	0.0	Nm	Load torque
torque_pos	0.0	Nm	Torque in positive direction
torque_neg	0.0	Nm	Torque in negative direction
kv_torque	0.0120116	Nms	Speed torque factor
inertia	0.000109668	kgm <sup>2</sup>	Mass moment of inertia
t_filter_a	0.0	s	Acceleration filter time constant

Obr. 34 Výsledné parametry regulátoru servomotoru. [17]

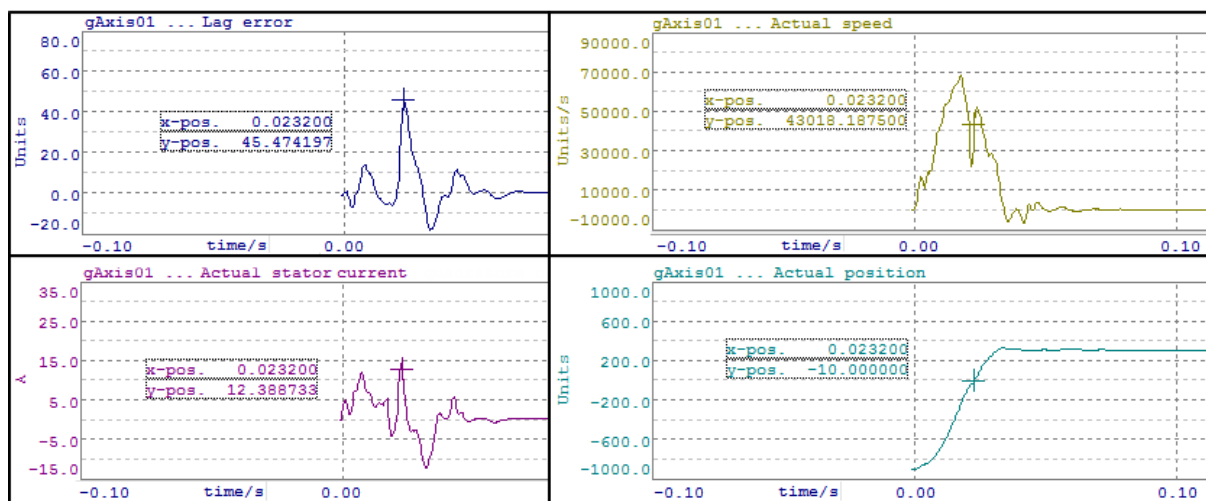
Dříve než bylo možné přejít k testování základních pohybů motorů, bylo nutné provést kontrolu řídicí smyčky regulátoru pro kontrolu stability systému. Podstatou této kontroly bylo pouštění krátkých poruchových signálů do kontrolní smyčky. V případě správného nastavení regulátoru by měly poruchové signály odeznít. V testovacím okně, kde byly nastavovány režimy ladění regulátorů polohy a rychlosti, byl nastaven mód na hodnotu „ncTEST“. Po aplikování testu byla kontrolována odezva systému na poruchu skrze grafy znázorňující například závislost odezvy systému



na čase, v trasovacím okně („Trace“). Trasovací okno slouží pro zobrazování dat v grafech. Uživatel si může nastavit sledované proměnné (např. proud ve statoru, nastavované a aktuální rychlosti, zrychlení apod.). Další možností je nastavit automatické spuštění měření („trigger“) na příslušnou veličinu, vzorkování časové osy, atd. Všechny doposud provedené změny v parametrech regulátoru, motoru a enkodéru byly hromadně uloženy do inicializační tabulky příslušného objektu osy v projektu. Nyní byly osy (lineární a rotační motor) připraveny pro aplikaci základních pohybů, referování pozic a provádění pohybů podle příkazů z řídicího programu.

### 10.3 Testování základních pohybů pohonů

Po ověření správného fungování systému (odezvy systému na poruchové signály) bylo přistoupeno k testování základních pohybů robotického stolního fotbalu. Testování spočívalo v rotaci servomotoru a lineárního pohybu motoru LinMot®, při kterém byl sledován chod mechanické části, zejména tření v kluzných ložiscích, tření v dutém hřídeli s trnem a vibrace v různém spektru zadaných rychlostí při přímočarém pohybu. Brankář byl nastaven do vodorovné počáteční polohy, stejné jako v příkladě při návrhu rotačního motoru (Obr. 14). Cílová poloha byla nastavena na hodnotu  $120^\circ$ , tedy v jednotkách programu na velikost 1 200 jednotek. V těch samých jednotkách byla zadána maximální úhlová rychlost o velikosti  $83\,250 \text{ jednotek} \cdot \text{s}^{-1}$  ( $145,3 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ) a maximální zrychlení na hodnotu  $3\,850\,250 \text{ jednotek} \cdot \text{s}^{-2}$  ( $6720,2 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-2}$ ). S nastavenými hodnotami byl uskutečněn odpal. Pomocí sledovacího okna s nastaveným spouštěčem byl pořízen záznam, jehož průběh lze vidět na následujícím obrázku s vybranými závislostmi veličin na čase.



Obr. 36 Závislosti veličin na čase při odpalu míčky.[17]

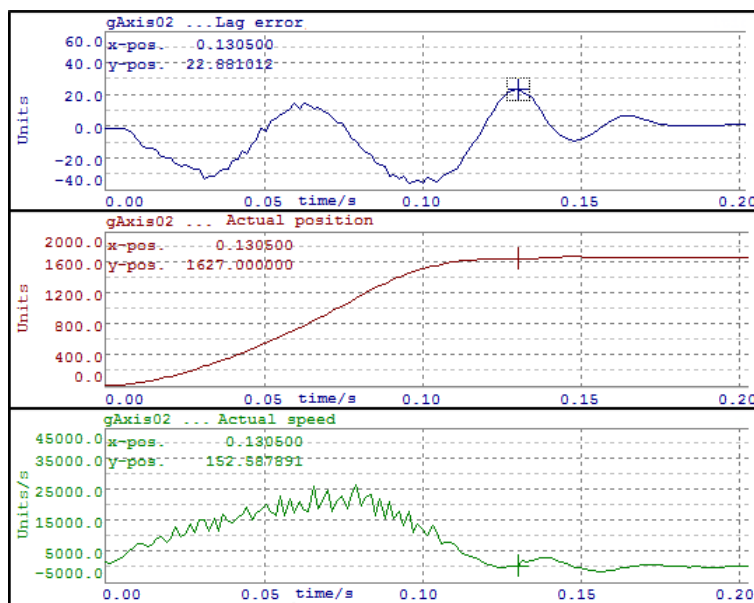
Kurzor zaznačený v grafech na obr. 36 ukazuje okamžik odkopnutí míčky brankářem. Lze pozorovat očekávané navýšení velikosti chyby nastavované pozice („Lag error“) o velikosti 45,47 jednotek, což je v přepočtu na stupně velikost  $4,547^\circ$ . Lze si všimnout, že naměřený čas odpalu  $t_{\text{real}} = 0,023 \text{ s}$  odpovídá vypočítanému času  $t = 0,02 \text{ s}$  (Tab. 4). Na grafu aktuální rychlosti lze spatřit skokovou změnu rychlosti v okamžiku odpalu, při které se změnila hodnota z  $53\,043 \text{ jednotek} \cdot \text{s}^{-1}$  na velikost  $21\,526 \text{ jednotek} \cdot \text{s}^{-1}$ . Při odchylce  $4,547^\circ$  a změně rychlosti v přepočtu o hodnotě  $550 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$  musel zareagovat regulátor zvýšením proudu o velikosti 14,5 A ve statoru motoru, což bylo přibližně 70% z maximálního proudu motoru. Průběh závislosti aktuální pozice na čase byl plynulý se sníženou strmostí v čase odpalu. Při ustálení do cílové pozice  $120^\circ$  došlo k odchylce z počátku ustálení o velikosti  $1,5^\circ$  a následně byl systém ustálen do rovnovážného stavu. Celkový čas, za který došlo k dosažení rovnovážného stavu, je o velikosti 0,064 s.

Druhým testovacím pohybem byl přímočarý pohyb lineárního motoru. Robotická osa vykonala přímočarý pohyb mezi krajními body maximálního možného posuvu, což byla vzdálenost 1650 mm. Vzdálenost byla menší než uvažovaná v kapitole 6.3 ( $L = 0,17 \text{ m}$ ) z důvodu konstrukčních



úprav robotické osy. Maximální rychlost byla zvolena  $20\,000 \text{ jednotek} \cdot \text{s}^{-1}$  a zrychlení  $400\,000 \text{ jednotek} \cdot \text{s}^{-2}$ , což v převedených jednotkách odpovídalo  $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  a  $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  (přibližně 75 % z vypočtených hodnot z kap. 6.3). Výsledný průběh pohybu byl zaznamenán pomocí trasovacího okna (Obr. 37). V grafech je vyznačen kurzorem časový okamžik, kdy docházelo k ustavování aktuální hodnoty polohy na požadovanou hodnotu. Velikost odchylky byla v tento čas 22,88 jednotek, což je v přepočtu 2,288 mm. Doba ustálení systému na žádanou hodnotu polohy byla 0,18 s. Ve srovnání se spočítanou hodnotou (0,12 s) byl doba reálného lineárního pohybu větší. Delší časový úsek byl dán zadáním menším zrychlením a vibracemi robotické osy na trnu teleskopického uložení.

Průběh rychlosti a odchylky obsahoval drobné kmity, které byly zapříčiněné vibracemi. Kmitání vznikalo v místě kluzného ložiska teleskopického uložení (Obr. 19 PTFE ložisko). Vůle v ložisku způsobovala vzpříčení trnu v dutině osy brankáře a tím vznikalo kmitání, které způsobovalo zadrhávání plynulé posunu robotické osy.



Obr. 37 Závislosti veličin na čase pro lineární přesun brankáře. [17]

Kmity byly v pásmu rychlostí od  $1,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  až po  $2,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  a byly důvodem vzniku hlasitých vibrací na robotickém fotbálku. Proto došlo k úpravě zmíněného ložiska, kdy byla upravena vůle ložiska na velikost, která nezpůsobovala rozkmitání soustavy.

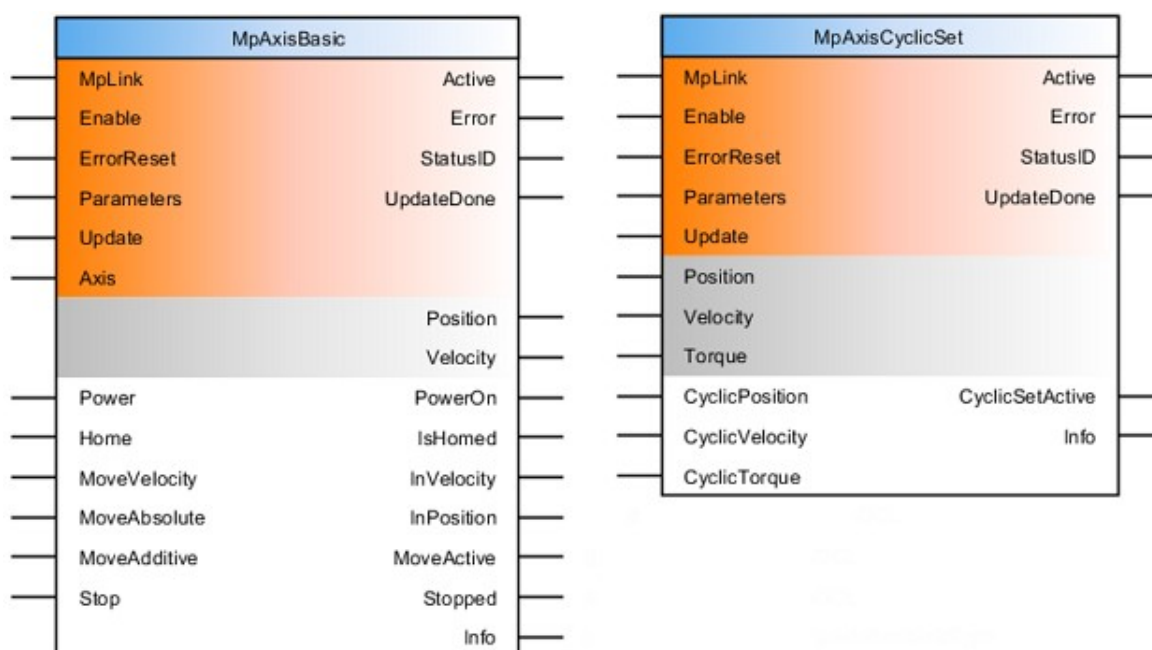
Situaci odpalu míčku zaznamenávala i průmyslová kamera. Měření bylo za daných podmínek pouze přibližné. Změřená rychlost míčku při odpalu dosáhla hodnoty až  $10,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , což byla vyšší hodnota oproti uvažované velikosti rychlosti  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  při návrhu rotačního motoru. Rozdíl rychlostí mohl být zapříčiněn chybou měření (zpracováním dat). Kamera zpracovávala pozici míčku z pořízených snímků. Na těchto snímcích byl míček, při jeho vysokých rychlostech, zobrazován rozmazaně. Neostrost snímků měla za následek špatnou identifikaci jeho profilu algoritmem kamery, tudíž mohlo dojít ke špatnému zjišťování jeho pozice. Na základě nepřesných poloh byla pak v programu druhého řešitele určena rychlost, která v sobě nesla chybu měření polohy míčku. [19]



## 11 IMPLEMENTACE ROZHRANÍ PRO ŘÍDÍCÍ PROGRAM

Základem tvorby implementace rozhraní pro řídicí program byla tzv. „Mapp“ technologie, ve které byly vytvořeny unikátní názvy odkazů („MpLink“) pro jednotlivé motory os robotického fotbalu. Technologie zahrnuje mimo diagnostiky také řízení pohonů. Pro řízení pohonů byly využity dva funkční bloky „MpAxisBasic“ a „MpAxisCyclicSet“, které v sobě zahrnují všechny standardní PLCopen a B&R speciální funkční bloky. Tato standardizace umožňuje programovat funkce nezávislé na použitém hardwaru, který splňuje tyto normy.

Pro programování pohybů reálných os byly volány funkční bloky (Obr. 39) s nastavenými vstupy. Na základě hodnot výstupů bloků řídicí program vyhodnocoval aktuální stav motoru (např. je na pozici, v pohybu, referován, chyba atd.) První blok byl používán pro zapnutí, vypnutí regulátorů polohy, referování os a pro základní pohyby (např. absolutní, aditivní). Sekundární blok, který je vázaný k prvnímu bloku, sloužil pro nepřetržité řízení pohonů podle nastavených parametrů.



Obr. 39 Funkční blok cyklického nastavování. [17]

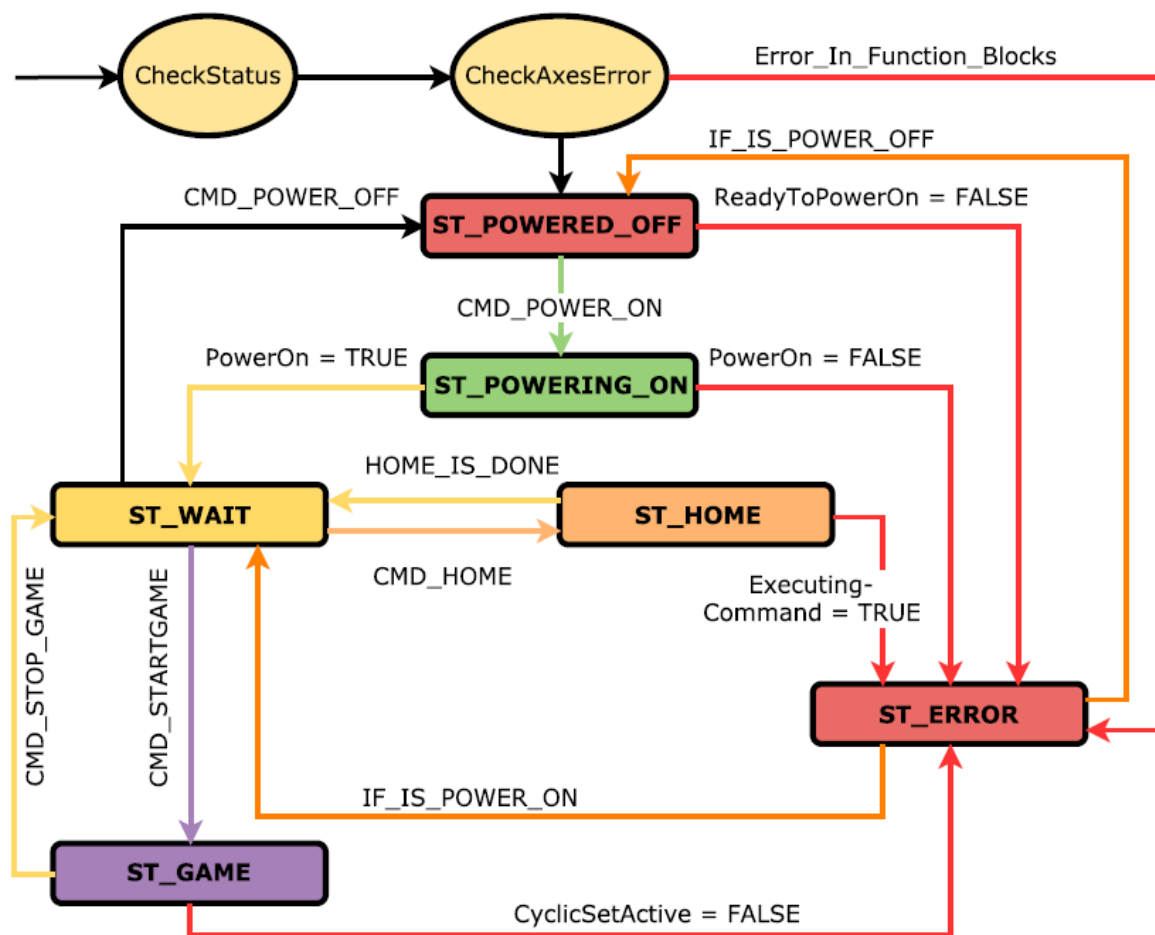
Program pro řízení motorů by implementován do dvou podprogramů. V každém podprogramu byla vytvořena inicializační, cyklická a ukončovací část. V inicializační části prvního programu je možnost v případě potřeby přepínat mezi simulací a reálným řízením, což bylo výhodné při implementaci programu bez přístupu k robotickému fotbalu. V cyklické části prvního programu je přiřazována na vstupy bloku „MpAxisbasic“ adresa objektu osy (např. „Axis := ADR(gAxis01)“), adresa odkazu „mapp“ komponenty (např. „MpLink := ADR(gMpLinkAxis01)“), parametry pohybu a referování (např. velikost rychlosti a zrychlení, typ referování, atd.) na vstup struktury „Parameters“. Podobný postup byl proveden pro funkční blok „MpAxisCyclicSet“. Vstup „MpLink“ je shodný jako u prvního bloku. Odlišnost byla pouze ve vstupních parametrech, které definují maximální rychlost, zrychlení a zpomalení pro průběžně čtené pozice. Po nastavení parametrů je nastavována hodnota vstupu „Enable“ na „TRUE“, která při následném provolávání ukládá všechny nastavené parametry. V ukončovací části prvního programu byl implementován vstup obou funkčních bloků „Enable“ na hodnotu „FALSE“. Změna hodnoty při následném provolání bloku způsobuje resetování všech jeho výstupů.

V druhém podprogramu byl implementován stavový automat (Obr. 40), jehož změny stavů jsou koncipovány na základě uživatelských příkazů z dotykového displeje. Mezi uživatelské volby

byly navrženy příkazy „zapni stroj“, „vypni stroj“, dále „referuj osy“, „začni hru“, „ukonči hru“ a poslední příkaz pro výpis chyb. Program bude informovat o úspěšném provedení uživatelských příkazů prostřednictvím výstupních proměnných např. „motory zapnuty“, „referování v pořádku“, „hra aktivní“, apod.

Implementace druhého podprogramu byla pouze v cyklické části programu. Nejprve byly naprogramovány akce, kterými je kontrolován stav stroje (CheckStatus) a chybové hlášení ve funkčních blocích (CheckAxesError). První akce aktualizuje hodnoty proměnných pro uživatelské rozhraní na displeji. V následné kontrole chyb je stavový automat při jejich nalezení převeden do chybového stavu. Pokud byly při kontrole funkční bloky všech řízených os v pořádku, robotický fotbalček zůstává ve stavu vypnutém (ST\_POWERED\_OFF). Při příkazu zapnutí regulátorů (CMD\_POWER\_ON) je kontrolována hodnota výstupu funkčního bloku (FB) „ReadyToPowerOn“. Při hodnotě „TRUE“ přechází automat do stavu „ST\_POWERING\_ON“, kde jsou postupně zapínány všechny regulátory os. Po jejich úspěšném zapnutí (PowerOn = TRUE) program čeká na příkazy od uživatele (ST\_WAIT). Odtud je možné příkazem pro referování (CMD\_HOME) provést proceduru, která ve výsledku zajistí přesné polohování robotických os. Procedura (ST\_HOME) je tvořena stavovým automatem, který v prvním kroku kontroluje, jestli funkční bloky nevykonávají pohyb a jestli jsou zapnuty regulátory. Pokud jsou osy připraveny, je provedeno jejich referování a následné inicializační nastavení poloh motorů. V případě úspěšného provedení těchto akcí přechází program z vnitřní procedury do čekacího stavu hlavního stavového automatu. Volbou příkazu pro spuštění hry (CMD\_STARTGAME) přejde automat do stavu (ST\_GAME), kdy pohony robotického fotbalčku jsou cyklicky řízeny na základě příchozí polohy z řídicího programu druhého řešitele. Na vstup „Position“ funkčního bloku „MpAxisCyclicSet“ se přivedou hodnoty pozic z hlavního algoritmu a vstup „CyclicPosition“ se nastaví na hodnotu „TRUE“ (odstartuje cyklické polohování). Instrukcí uživatele „CMD\_STOP\_GAME“ je možné se ze stavu pro hru vrátit do čekání na příkaz, ve kterém je volba vypnout regulátory motorů příkazem „CMD\_POWER\_OFF“.

Před přejitím do dalšího stavu, ať už v hlavní proceduře, nebo ve vedlejších stavových automatech, jsou kontrolovány konkrétní výstupy funkčních bloků, které jsou nezbytné pro následující operaci (stav). Pokud dojde k vyhodnocení nepřipravenosti bloků, dojde k přechodu do chybového stavu. V něm dochází k resetování funkčních bloků a v případě pohybu motorů k jejich zastavování. Na konci chybového stavu se lze vrátit do čekacího, nebo vypnutého stavu.



Obr. 40 Hlavní stavový diagram robotického fotbalu. [20]

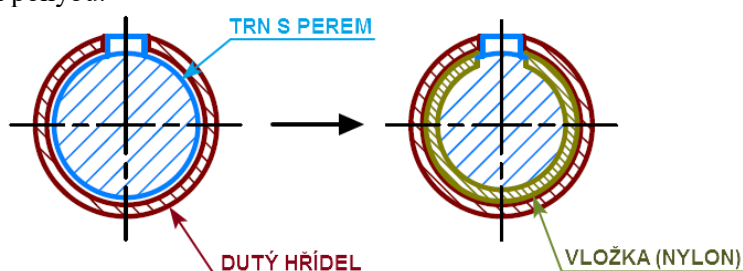


## 12 NÁVRHY PRO POKRAČOVÁNÍ

Dosavadní práce vedla k rozpohybování jedné osy (brankáře) robotického stolního fotbalu. Při realizaci se vyskytly mechanické nedostatky, které lze odstranit vhodnými úpravami.

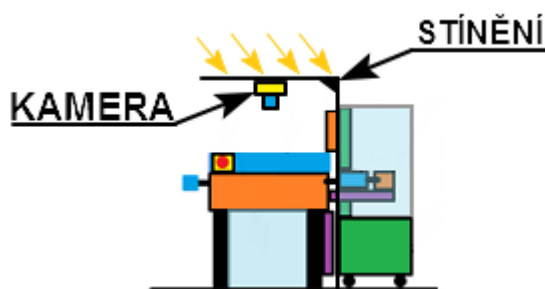
### 12.1 Návrhy na zlepšení

1. Pohyb trnu s těsným perem v dutém hřídeli produkuje hluk vyplývající z tření kovových povrchů. Tření mezi boční stranou pera a drážkou pro pero v dutém hřídeli není zásadní. Hlavní vliv na vznikající tření má vnější válcová plocha trnu a vnitřní válcová plocha dutého hřídele (Obr. 41). Řešením je úprava profilu trnu. Po úpravě plochy válce bude dodatečně umístěna vložka z kluzného materiálu (např. Nylon). Takto upravený trn bude produkovat méně hluku z důvodu snížení tření mezi povrchy trnu a dutého hřídele. Celkově změna přinese i snížení odporu mechanické soustavy při pohybu.



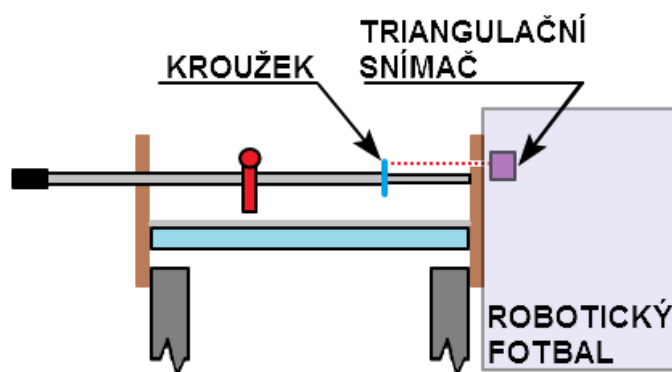
Obr. 41 Úprava trnu.

2. Umístění kamery na vysouvacím rameni bylo řešeno provizorně pro laboratorní podmínky. Návrhem a realizací vhodného držáku bude zajištěno pevné uchycení kamery, který v případě zasunutí ramena bude možné spolu s kamerou snadno odmontovat. Robotický fotbalák obvykle nebude přemísťován několikrát za den, proto uchycení držáku k vysouvacímu rameni bude možné provést pomocí šroubů. Úchyt kamery bude vyroben například ze slitiny hliníku (nízká hmotnost).
3. Dle závislosti na použitém typu osvětlení bude navržena konstrukce pro zdroje světla, která bude sofistikovaně upevněna například k nohám stolu. Navržená konstrukce nejen stabilně upevní osvětlení, ale přichycením konstrukce k nohám stolního fotbaláku dojde ke zvýšení tuhosti stolu. Výhodou tohoto spojení bude kompaktnost při přemísťování stolu (při kterém se nebude muset přemísťovat robotický fotbalák po částech). Nejistotou v osvětlení ze pod stolu je světlo z okolí nad stolem fotbaláku (sluneční svit, osvětlení hal). V tomto případě bude použit pro stínění stánek, či jednoduchý rám s výsuvnou látkou (roletou) černé barvy.



Obr. 42 Typ stínění.

4. Pro efektivnější způsob hraní robotického fotbalu bude potřeba znát polohu os, ovládaných lidským týmem. Na základě známých pozic protihráčů bude řídicí systém schopen vyhodnotit vhodný směr odpalu míčku, nebo si přihrát na lepší pozici pro vystřelení. Prvým řešením by mohlo být umístění druhé kamery nad stůl přichycením k uvažovanému stínění (Obr. 42). Průmyslová kamera, schopná detekce barevných objektů, by se nastavila k detekování protihráčů lidského týmu. Zmíněné provedení snímání poloh hráčů druhého týmu by tolik nezasáhlo do úprav robotického stolního fotbalu, ale v rámci ceny při koupi kamery by značně narostly náklady. Druhý způsob detekce protihráčů by už zasahoval do stávající konstrukce stolu. Na straně robotického fotbalu by se umístili triangulační snímače vzdálenosti. Osy protihráčů by se osadily kroužky (Obr. 43), které by reflektovaly vysílaný paprsek ze senzorů. Na základě výstupní hodnoty senzorů by se dopočítávala pozice jednotlivých plastikových hráčů na osách polohovaných lidskými hráči.



Obr. 43 Snímání polohy osy protihráče.

Pro umístění snímačů a kroužků by bylo nutné provést úpravy hrací soupravy, zato by však nebyly vysoké celkové náklady na tuto úpravu a koupi zmíněných snímačů oproti nákupu průmyslové kamery.

## 12.2 Pokračování projektu

Jelikož byla zhotovena jedna osa robotického stolního fotbalu, pokračování bude směřovat k úpravě zbývajících os (obrana, záloha, útok). Po zapojení všech pohonů budou změřeny hodnoty proudů při provozu a na základě tohoto měření bude upraven počet zdrojů pro napájení motorů. Pro bezpečnost obsluhy bude nutné aplikovat navržené bezpečnostní prvky. Pro snímání vstřelení branky budou aplikovány vyvinuté detektory v místech pod brankou, v propadové části stolu. Na základě zvoleného typu osvětlení bude stanoven jeho způsob napájení (ze zdroje, ze systému X20). Po těchto krocích dojde k dodatečnému sestavení pojízdného kabinetu, které bude spočívat v umístění displeje, zakrytování transparentními a plnými deskami a provedení konečné elektroinstalace.



## 13 ZÁVĚR

Úlohou předložené diplomové práce byl konstrukční návrh robotického fotbalu s realizací řízení jedné osy. Kapitoly výše popisují nejen výběr hlavních komponent (hrací souprava, pohony, bezpečnostní komponenty a optické senzory), ale také konstrukci lineárně rotačního spojení lineárního a rotačního motoru, včetně celkového návrhu uložení řídicího systému do pojízdného kabinetu.

Rešeršní část dokumentu je věnována popisu dosud zhotovených robotických fotbalů, kde jsou zmíněny výsledné klady a zápory jednotlivých řešení. Další odstavce popisují společnost B&R a její produkty se zaměřením na výrobky, které byly použity pro řízení robotického fotbalu. Jedná se zejména o sběrníkový systém, řízení pohybu a průmyslové počítače s programovacím prostředím Automation Studio. Podkapitola úvodní části seznamuje s historií stolního fotbalu, popisuje herní soupravy a herní strategii.

Původní hrací souprava byla upravena pro dosažení konstantních podmínek pro snímání kamerou z pod stolu. Původní dřevotřísková deska nesoucí hrací plochu z pískovaného skla, byla vyměněna za transparentní plexisklo o stejných rozměrech. K nohám stolu byly připevněny plné desky, které zabraňují prostupu světla do míst umístění kamery. Zároveň byly vedle průmyslové kamery položeny zdroje světla, které napomohly zlepšit podmínky pro detekci míčku. Na vrchní část stolu byla přidána ochranná bariéra z plexiskla, na které budou připevněny bezpečnostní prvky. Jedná se o optickou mříž a stop tlačítka. Bariéra zároveň vymezuje bezpečnou vzdálenost od pohybující se robotické osy. Pro snímání vstřelení branky byla navržena vlastní detekce. Detektor se skládá z držáku nesoucího optický senzor vysílač – přijímač, který vysílá viditelný červený paprsek. Pomocí zrcátka bude efektivně veden paprsek, který pokryje celou propadovou plochu míčku pod brankou. Poslední úpravou byla náhrada původního uložení upravené tyče za přesnější a s menší vůlí pro ochranu statorového vinutí lineárního motoru.

Parametry rotačního motoru byly vypočítány z požadované rychlosti míčku při odpalu. Specifikace lineárního pohonu byla odvozena z pokusu, při kterém se změřil čas posunutí osy lidským hráčem mezi krajními body. Změřený čas byl brán jako limitující pro návrh lineárního motoru. Výhodou lineárního motoru LinMot® je absence mechanických vazeb mezi statickou a pohybující se částí motoru. Podle stanovených motorů bylo navrženo jejich uložení. Motory jsou umístěny v jednotlivých přírubách na společné základně z hliníkové slitiny. Pro zajištění současné rotace a posunu bylo navrženo uložení trnu s těsným perem, konajícího posuv v dutém hřídeli s drážkou pro pero. Společná základna je kompaktní, nabízí možnost si předem složit mechanismus do společné osy před montáží do rámu. Velkou výhodou je také univerzálnost uložení pohonů. Při budoucí úpravě zbývajících tří tyčí (obrana, záloha, útok) dojde pouze ke změně velikosti posuvů.

Před implementací komunikačního rozhraní byly převedeny základní parametry lineárního motoru na odpovídající charakteristiky rotačního motoru z důvodu absence schopnosti použité verze Automation Studia řídit lineární pohony. Následně bylo provedeno fázování a automatická parametrizace neznámých veličin motoru LinMot®. U servomotoru od firmy B&R byly načítány charakteristické veličiny přímo z enkodéru přes rozhraní EnDat 2.2. U pohonů bylo poté provedeno automatické nastavení regulátorů polohy pomocí testovacích signálů. S takto připravenými motory byly uskutečněny základní pohyby pro otestování chodu mechanismu. U posunu byly zjištěny vibrace způsobené vzpříčením teleskopického uložení robotické tyče. Pro odstranění této vady bylo upraveno odpovídající kluzné ložisko.

Komunikačním rozhraní bylo programováno v jazyce strukturovaného textu (podle standardu IEC 61131-3). Pro řízení motorů byly využity funkční bloky z „Mapp“ technologie vyvinuté společností B&R. Bloky kromě specifických procedur firmy B&R obsahují také standardizované funkční bloky PLCopen. Jádrem komunikačního rozhraní je tvořeno stavovým automatem, který přechází mezi svými stavy pomocí uživatelských příkazů nebo po dokončení podprogramů. Mezi stavy automatu byly například implementovány akce pro referování robotických os, stav pro hraní a chybový stav. Ve výsledku bylo rozhraní připraveno pro uživatelské vstupy (např. „zapni“, „vypni“, „hraj“) a pro vektor poloh (natočení a rotace) jednotlivých pohonů. Všechny tyto řídicí údaje jsou posílány z řídicího programu druhého řešitele.

Složená sestava robotického stolního fotbalu tvoří ucelený systém pro pokračování realizace

robotizace zbývajících os obrany, zálohy a útoku. Sestavu lze rozložit na dva menší celky za pomoci jedné osoby. Pojízdňý kabinet je schopen pojmout kompletně celý řídicí systém, včetně rámu s uložením pohonů, při zachování dobré manipulovatelnosti. Schopnost přemísťování stolu fotbalu zůstala jako u původní hrací soupravy, tj. za pomoci nejméně dvou osob. Opětovné spojení vozíku a stolu se provede přitažením rámu s pohony k nohám stolu a spojením hřídele lineárního motoru s robotickou osou za pomoci spojky. V takto spojené sestavě stačí vysunout rameno s kamerou pod stůl a robotický fotbal je mechanicky připraven. Ve složeném stavu lze robotický systém připojit do sítě pomocí klasické zásuvky (230V), což přináší výhodu v snadné dostupnosti tohoto zdroje napětí. Takto nachystaný systém je připraven k zapnutí.

Všechny vytvořené součásti byly modelovány v programu Autodesk Inventor Professional 2016 s příslušnou výkresovou dokumentací. Modely, výkresy a dodatečná videa jsou přístupná na přiloženém CD. Realizaci návrhu robotického fotbalu se zhotoveným řízením jedné osy lze spatřit na obrázcích v kapitole č. 9.

## 14 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Weigel, Thilo; Nebel, Bernhard. <weigel,nebel@informatik.uni-freiburg.de> *KiRo – An autonomous table soccer player* [PDF dokument]. Institut für Informatik, Universität Freiburg, 2002 [cit. 17. listopadu 2015]. Dostupný z: <<http://www2.informatik.uni-freiburg.de/~kiro/english/index.html>>.
- [2] Weigel, Thilo. <weigel@informatik.uni-freiburg.de> *KiRo – A Table Soccer Robot Ready for the Market* [PDF dokument]. Institut für Informatik, Universität Freiburg, 2002 [cit. 17. listopadu 2015]. Dostupný z: <<ftp://ftp.informatik.uni-freiburg.de/documents/papers/ki/weigel-ki2005.pdf>>.
- [3] Aeberhard, M.; Connelly S.; Tarr, E.; Walker, N. *Single Player Foosball Table with an Autonomous Opponent* [PDF dokument]. School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology, December 10<sup>th</sup>, 2007 [cit. 18. listopadu 2015]. Supervisor Dr. James Hamblen. Dostupný z: <[http://www.eskibars.com/projects/foosball\\_robot/final\\_rpt.pdf](http://www.eskibars.com/projects/foosball_robot/final_rpt.pdf)>
- [4] Connelly, Shane. *Shane Stuff!* [online]. 1 October 2007, 2015 [cit. 18. listopadu 2015]. Dostupný z: <[http://blogthing.eskibars.com/project/foosball\\_robot/](http://blogthing.eskibars.com/project/foosball_robot/)>.
- [5] Myslivec, Vojtěch. *Robotický stolní fotbal*. Praha, květen 2015. 46 s. Diplomová práce na Elektrotechnické fakultě ČVUT v Praze na Katedře Řídící techniky. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Burget, Ph.D.
- [6] Alsalihi, A.; Najjar, K.; Van Scoy, B.; Zifer, J. *Automated Foosball Table* [PDF dokument]. The University of Akron, November 28, 2011 [cit. 19. listopadu 2015]. Supervisor Dr. Hartley, Dr. Tran. Dostupný z: <<https://www.uakron.edu/dotAsset/1e2fb3d4-8c59-475e-9473-ed98b2504f17.pdf>>.
- [7] B&R. *B&R Perfection in Automation* [online]. 2015, [cit. 4. prosince 2015]. Dostupný z: <<http://www.br-automation.com/en/perfection-in-automation/>>.
- [8] Vaculíková, Eva. Společnost B&R bilancuje. *Automa*, 2009 [cit. 4. prosince 2015], roč. 19., č. 12, s. 12-13. SSN 12010-9592. Dostupný z: <<http://automa.cz/res/pdf/40133.pdf>>.
- [9] *B&R Company Brochure*. Eggelsberg – B&R. August, 2014 [cit. 4. prosince 2015]. 32s. Dostupný z: <<http://www.br-automation.com/en/downloads/#categories=catalogues-and-brochures>>.
- [10] Koželka, Martin. ACOPOS – snadné řešení složitých aplikací. *Automa*, 2000 [cit. 5. prosince 2015], roč. 6., č.9. SSN 12010-9592. Dostupný z: <[http://automa.cz/index.php?id\\_document=27879](http://automa.cz/index.php?id_document=27879)>.
- [11] B&R automatizace, spol. s r. o. Servoměniče B&R automaticky odstraňují vlečnou chybu při regulaci polohy. *Automa*, 2014 [cit. 5. prosince 2015], roč. 19., č. 5, s. 62. SSN 12010-9592. Dostupný z: <<http://automa.cz/res/pdf/52535.pdf>>.
- [12] B&R. *B&R Automation Studio Target for Simulink®* [PDF dokument]. 2011 [cit. 6. prosince 2015]. Dostupný z: <<http://kyb.fei.tuke.sk/laboratoria/prezentacie/br%20automation%20studio%20target%20for%20simulink.pdf>>.

- [13] Garlando. *Sport and leisure* [online]. 2016, [cit. 26. ledna 2016]. Dostupný z: <<http://www.garlando.cz/>>.
- [14] NTI AG – LinMot & MagSpring. *Linear Motors technology Pioneer* [online]. 2015, [cit. 22. února 2016]. Dostupný z: <<http://www.linmot.com/>>
- [15] di-soric Solutions GmbH & Co. KG. *OESV 19 K 200 P3K* [PDF dokument]. 2016, [cit. 25. dubna 2016]. Dostupný z: <[http://www.di-soric.com/en/OESV-19-K-2000-P3K-11528.html?pdb\\_kategorie=1525](http://www.di-soric.com/en/OESV-19-K-2000-P3K-11528.html?pdb_kategorie=1525)>
- [16] DATALOGIC S.p.A. *DS-SLIM-ENA4* [PDF dokument]. 2015, [cit. 25. dubna 2016]. Dostupný z: <<http://www.datalogic.com/eng/products/industrial-automation/safety/slim-pd-688.html>>
- [17] Automation Studio V 4.2. *B&R Perfection in Automation*. [software]. 2016, [cit. 5. května 2016]. Dostupný z: <<http://www.br-automation.com/cs/soubory-ke-stazeni/#categories=software/automation-studio/automation-studio-42>>
- [18] DR. JOHANNES HEIDENHAIN GmbH. *Measurement and Control Technology for Demanding Positioning Tasks*. [online]. 2016, [cit. 5. května 2016]. Dostupný z: <[http://www.heidenhain.de/de\\_EN/fundamentals/interfaces/endat-22/](http://www.heidenhain.de/de_EN/fundamentals/interfaces/endat-22/)>
- [19] Jediný Lukáš. *B&R automatizace s.r.o., Stránského 3140/39, 616 00 Brno* [ÚSTNÍ sdělení]. 2. květen 2016 [cit. 8. května 2016].
- [20] JGraph Ltd. *Draw.io* [software online]. Ver. 5.4.4.4, 2016 [cit. 8. května 2016]. London (England): Wenlock Road 20-22. Dostupný z: <<https://www.draw.io/>>
- [21] Autodesk Inventor Professional 2016. *Mechanical design and 3D CAD software* [software]. 2016

**OBSAH CD**

<i>Robotic_Table_Foosball_Documentation.pdf</i>	Dokument pro prohlížení a tisk.
<i>Robotic_Table_Foosball_Design.zip</i>	Komprimovaný soubor s 3D modely, výkresy.



## SEZNAM VÝKRESOVÉ DOKUMENTACE

1-DS-1	SESTAVA_R_FOTBALU	VÝKRES SESTAVENÍ
1-DS-30	RÁM	VÝKRES SESTAVENÍ
2-DS-4	ULOŽENÍ POHONŮ	VÝKRES SESTAVENÍ
2-DS-14	NÁVRH_VÝPLNÍ	VÝKRES SESTAVENÍ
2-DS-20	OCHRANNÉ_PLEXI	VÝKRES SESTAVENÍ
2-DS-21	KRYCÍ_PLEXI	VÝROBNÍ VÝKRES
2-DS-22	S_OCHRANNÉ_PLEXI	VÝKRES SESTAVENÍ
3-DS-2	DĚSKA	VÝROBNÍ VÝKRES
3-DS-3	SPOJKA	VÝROBNÍ VÝKRES
3-DS-6	ULOŽENÍ_HŘÍDELE	VÝKRES SESTAVENÍ
3-DS-12	DESKA_MOTORY	VÝROBNÍ VÝKRES
3-DS-14	NOHA_STOLU	VÝROBNÍ VÝKRES
3-DS-15	OSA	VÝROBNÍ VÝKRES
3-DS-17	SESTAVA_TRNU	VÝKRES SESTAVENÍ
3-DS-18	ULOŽENÍ_TRNU	VÝROBNÍ VÝKRES
3-DS-19	VÍKO_TRNU	VÝROBNÍ VÝKRES
3-DS-23	CLONA_ŠIROKÁ	VÝROBNÍ VÝKRES
3-DS-24	CLONA_ÚZKÁ	VÝROBNÍ VÝKRES
3-DS-25	DRŽÁK	VÝROBNÍ VÝKRES
3-DS-27	OPTIKA_BRANKA_S	VÝKRES SESTAVENÍ
3-DS-28	PODPĚRA_PLEXI	VÝROBNÍ VÝKRES
3-DS-29	ULOŽENÍ_OSY	VÝKRES SESTAVENÍ
4-DS-5	FE_SPOJKA	VÝROBNÍ VÝKRES
4-DS-7	VÍKO_LOŽISKA	VÝROBNÍ VÝKRES
4-DS-8	ULOŽENÍ_LOŽISKA	VÝROBNÍ VÝKRES
4-DS-9	TRN	VÝROBNÍ VÝKRES
4-DS-10	PŘÍRUBA	VÝROBNÍ VÝKRES
4-DS-11	ULOŽENÍ_LINMOT	VÝROBNÍ VÝKRES
4-DS-13	PODLOŽKA_M8	VÝROBNÍ VÝKRES
4-DS-15	KLUZNÉ_LOŽISKO	VÝROBNÍ VÝKRES
4-DS-16	OSA_VNĚŘNÍ	VÝROBNÍ VÝKRES
4-DS-26	L_DRŽÁK	VÝROBNÍ VÝKRES



